

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**Навчально-наукової інженерно-технічний інститут
імені акад. І.С. Гулого**

Кафедра машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

_____ Сергій БЛАЖЕНКО

(підпис)

(ім'я та прізвище)

« ___ » _____ 20__ р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Олександр ГАВВА

(підпис)

(ім'я та прізвище)

« ___ » _____ 20__ р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності 133 – Галузеве машинобудування
освітньо-професійної програми «Інжиніринг фармацевтичних та
біотехнологічних виробництв»

на тему:

**Дослідження та удосконалення роторного пресу продуктивність 140
тисяч таблеток за годину**

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ОФ-2-4м

Плещук Андрій Ілліч.

_____ (прізвище, ім'я, по батькові повністю)

Керівник Губеня Олексій Олександрович

_____ (прізвище, ім'я та по батькові повністю)

Консультанти

_____ (ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

_____ (ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент

_____ (ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач _____

(підпис)

Київ – 2025 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інженерно-технічний інститут імені акад. І. С. Гулого
Кафедра машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв
Освітній ступінь «Магістр»
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
Освітньо-професійна програма: Інжиніринг фармацевтичних та біотехнологічних виробництв

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри МАХФВ

_____ **Олександр ГАВВА**
“ ____ ” _____ грудня 2025 ____ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Плещук Андрій Ілліч

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: **Дослідження та удосконалення роторного пресу продуктивність 140 тисяч таблеток за годину**

Керівник роботи **Губеня Олексій Олександрович**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від 15.10.2025 р. № 845-КС

2. Строк подання здобувачем роботи 15.12.2025

3. Вихідні дані до роботи. Предмети досліджень – технічні рішення з удосконалення роторного таблеткового пресу, спрямовані на зменшення динамічних навантажень, підвищення рівномірності заповнення матриць і стабілізацію силового профілю пресування.

4. Зміст пояснювальної записки

Анотація (українською та англійською мовами); Вступ; Матеріали і методи досліджень; Результати досліджень, їх математично-статистичне оброблення, пояснення та обговорення; Маркетингове (техніко-економічне), соціальне обґрунтування проекту; Застосування результатів (модернізація обладнання, реконструкція лінії); Безпека життєдіяльності; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу:

Слайди презентації: Актуальність теми; Сучасний стан наукової та практичної проблеми; Мета, завдання, об'єкт і предмети досліджень; Матеріали і методи досліджень; Результати досліджень та їх математично-статистичне оброблення, Висновки.

Креслення: Модернізація обладнання, реконструкція лінії (6 листів).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01.10.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Розділи пояснювальної записки:	01.11.2025	
	Вступ	10.11.2025	
	Матеріали і методи досліджень	15.11.2025	
	Результати досліджень, їх математично-статистичне оброблення, пояснення та обговорення	20.11.2025	
	Маркетингове (техніко-економічне), соціальне обґрунтування проекту	25.11.2025	
	Застосування результатів (модернізація обладнання, реконструкція лінії)	25.11.2025	
	Модернізація обладнання, реконструкція лінії	5.01.2025	
	Розрахункова частина	10.01.2025	
	Безпека життєдіяльності	12.01.2025	
	Висновки	14.01.2025	
	Презентація та креслення	15.12.2025	

Здобувач

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Андрій Плещук
(прізвище та ініціали)

Олексій ГУБЕНЯ
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження процесу таблетування твердих лікарських форм із застосуванням роторного таблеткового пресу високої продуктивності та розроблено інженерні рішення з його удосконалення з метою підвищення стабільності технологічного процесу й якості готової продукції. Об'єктом дослідження є процес формування таблеток у роторному таблетковому пресі, предметом дослідження – конструктивні та режимні параметри пресувального обладнання, що визначають силовий профіль пресування, рівномірність ущільнення та експлуатаційну надійність при продуктивності 140 тисяч таблеток на годину.

Метою роботи є підвищення ефективності та надійності роботи роторного таблеткового пресу шляхом удосконалення конструкції основних вузлів і оптимізації режимів пресування для забезпечення відтворюваності маси, міцності та геометричних параметрів таблеток у безперервному високошвидкісному виробничому циклі. Для досягнення поставленої мети проведено аналіз сучасних технологій таблетування, вимог фармакопей до якості таблеток, будови та принципу роботи роторних пресів, а також впливу швидкості обертання ротора, заповнення матриць і сил пресування на властивості готової продукції.

У роботі досліджено вплив режимів попереднього та основного пресування на силові характеристики процесу, встановлено залежності між швидкістю роботи преса, профілем навантаження та стабільністю параметрів таблеток. Показано, що при високій продуктивності зростає чутливість процесу до нерівномірності подачі порошкової маси та зносу прес-інструменту, що може призводити до збільшення розкиду маси й міцності таблеток. Проведено інженерні розрахунки навантажень на основні вузли преса, обґрунтовано вимоги до жорсткості конструкції, профілю кулачкових доріжок і умов контакту «пуансон – матриця» та «пуансон – ролик».

Запропоновано технічні рішення з удосконалення роторного таблеткового пресу, спрямовані на зменшення динамічних навантажень, підвищення рівномірності заповнення матриць і стабілізацію силового профілю пресування. Обґрунтовано доцільність використання двоступеневого пресування, оптимізації кінематичних параметрів руху пуансонів та впровадження автоматизованої системи контролю й керування технологічними параметрами процесу. Розглянуто питання охорони праці та безпеки експлуатації обладнання з урахуванням механічних, електричних і пилових факторів, характерних для фармацевтичного виробництва.

Наукова новизна роботи полягає у встановленні закономірностей впливу високошвидкісного режиму роботи роторного таблеткового пресу на силові характеристики пресування та якість таблеток, а також у комплексному інженерному обґрунтуванні шляхів підвищення стабільності процесу при продуктивності 140 тис. таб./год. Практичне значення роботи полягає в можливості впровадження запропонованих технічних рішень на фармацевтичних підприємствах для підвищення якості продукції, зменшення зносу прес-інструменту та підвищення надійності роботи таблеткових пресів.

Ключові слова: роторний таблетковий прес, таблетування, тверді лікарські форми, сила пресування, попереднє та основне пресування, прес-інструмент, автоматизація, продуктивність.

ABSTRACT

The Master's thesis presents a comprehensive study of the tablet compression process using a high-capacity rotary tablet press and proposes engineering solutions for improving its performance in pharmaceutical manufacturing. The object of the study is the tablet compression process in a rotary tablet press, while the subject of the research comprises the design and operating parameters of the press that determine the force profile, compaction uniformity and operational reliability at a capacity of 140,000 tablets per hour.

The aim of the work is to increase the efficiency and reliability of a rotary tablet press by improving the design of its main units and optimizing compression modes to ensure stable tablet mass, mechanical strength and geometric properties under continuous high-speed operation. To achieve this goal, modern tablet compression technologies, pharmacopoeial quality requirements, the design and operating principles of rotary presses, and the influence of turret speed, die filling and compression forces on tablet quality were analyzed.

The study investigates the effect of pre-compression and main compression modes on the force characteristics of the process and establishes relationships between operating speed, load profiles and tablet quality stability. It is shown that at high production rates the process becomes more sensitive to powder feed fluctuations and tooling wear, which may lead to increased variability in tablet properties. Engineering calculations of loads acting on the main press components were performed, and requirements for structural stiffness, cam track profiles and contact conditions in the "punch–die" and "punch–roller" interfaces were substantiated.

Technical solutions for improving the rotary tablet press are proposed, aimed at reducing dynamic loads, enhancing uniform die filling and stabilizing the compression force profile. The feasibility of two-stage compression, optimization of punch kinematics and implementation of an automated monitoring and control system is justified. Occupational safety and operational safety issues are also

addressed, considering mechanical, electrical and dust-related hazards typical for pharmaceutical production.

The scientific novelty of the work lies in establishing the influence of high-speed operating conditions on compression force characteristics and tablet quality, as well as in the integrated engineering justification of methods for improving process stability at a capacity of 140,000 tablets per hour. The practical significance of the study is the possibility of implementing the proposed solutions in pharmaceutical plants to improve product quality, reduce tooling wear and increase the operational reliability of rotary tablet presses.

Keywords: rotary tablet press, tablet compression, solid dosage forms, compression force, pre-compression, main compression, tooling, automation, productivity.

ЗМІСТ

Вступ	3
1. Аналітичний огляд стану питання	5
1.1. Процес таблетування та роторний таблетковий прес	5
1.2. Вимоги до процесу таблетування та роторного таблеткового пресу	7
1.3. Узагальнена схема процесу таблетування на роторному таблетковому пресі	9
1.4. Огляд обладнання для проведення процесу таблетування	11
1.5. Огляд роторних таблеткових пресів для високопродуктивного фармацевтичного виробництва	14
1.6. Висновки та задачі досліджень	16
2. Методика проведення досліджень	20
2.1. Об'єкт і предмет досліджень	20
2.2. Характеристика вихідної таблеткової маси та її фізико-механічні показники	20
2.3. Характеристика досліджуваного роторного таблеткового пресу та прес-інструменту	23
2.4. Принципова схема роторного таблеткового пресу	25
2.5. Схема експериментального стенду	27
2.6. Порядок проведення досліджень	29
2.6.1. Процес таблетування	29
2.6.2. Вимірювання зусиль пресування	29
2.6.3. Регулювання режимів роботи пресу	30
2.6.4. Відбір і контроль якості таблеток	30
2.6.5. Аналіз результатів експерименту	30
3. Результати досліджень	31
3.1. Визначення впливу швидкості обертання ротора на масу таблетки	31
3.2. Визначення впливу зусилля пресування на твердість таблеток	33
3.3. Визначення впливу зусилля пресування на щільність і міцність таблеток	34
3.4. Зміна показників якості таблеток після 1800 циклів пресування	36
3.5. Порівняння результатів досліджень	39
3.6. Висновки	41

<i>Відповідальна організація</i>	<i>Технічне узгодження Губеня</i>	<i>Пояснювальна записка</i>	<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i>	<i>Розробник документа Плещук</i>	<i>Назва, додаткова назва</i>	000000.М.Р.08.000.ПЗ			
.....	<i>Затверджено Гавва</i>		<i>Інд. змін</i>	<i>Дата видачі</i>	<i>Мова ПЛ</i>	<i>Арку "</i>

4. Реконструкція ділянки таблетування	43
4.1. Опис роботи ділянки таблетування	43
4.2. Технологічний прорахунок ділянки таблетування (роторийний таблетковий прес 140 тис. табл/год)	45
5. Модернізація апарату	54
5.1. Опис запропонованого технічного рішення	54
5.2. Будова та принцип роботи обладнання	54
5.3. Розрахунки	56
5.3.1. Розрахунок частоти обертання ротора для забезпечення продуктивності 140000 таб/год	57
5.3.2. Оцінка масової продуктивності та вимог до вузла подачі (живильника)	58
5.3.3. Оцінка об'єму заповнення матриці та глибини заповнення	59
5.3.4. Оцінка зусиль пресування та вимог до системи вимірювання	60
6. Вимоги до монтажу, експлуатації та ремонту обладнання	74
7. Система управління	80
8. Безпека життєдіяльності	83
Висновок	90
Література	93

ВСТУП

Фармацевтична промисловість належить до найбільш відповідальних галузей машинобудування та хіміко-технологічного виробництва, у яких стабільність роботи обладнання безпосередньо впливає на якість, безпечність і відтворюваність лікарських засобів. Таблетування є однією з основних операцій виготовлення твердих лікарських форм, а роторні таблеткові преси - ключовим технологічним обладнанням, що забезпечує формування таблетки з заданими геометричними та фізико-механічними параметрами. За високої продуктивності будь-які відхилення у роботі пресу призводять до порушення рівномірності маси таблеток, зниження їх міцності та збільшення відсотка браку.

Сучасні фармацевтичні підприємства широко застосовують роторні таблеткові преси продуктивністю понад 100 тисяч таблеток на годину. Підвищення продуктивності до рівня 140 тисяч таблеток на годину супроводжується зростанням динамічних навантажень на основні вузли пресу, інтенсивним зношуванням пуансонів і матриць, підвищеними вимогами до точності регулювання зусилля пресування та стабільності подавання таблеткової маси. За таких умов навіть незначні конструктивні або кінематичні недоліки обладнання можуть істотно впливати на ефективність і надійність технологічного процесу.

Однією з ключових проблем експлуатації високопродуктивних роторних пресів є нерівномірний розподіл навантажень між прес-інструментом, коливання зусилля пресування, вібраційні явища та локальні перевантаження елементів приводу і пресового механізму. Це призводить до прискореного зносу робочих поверхонь, збільшення простоїв обладнання, підвищення витрат на обслуговування та ризику отримання таблеток, що не відповідають вимогам фармакопейних стандартів. Умови тривалої безперервної роботи при високій продуктивності додатково загострюють ці проблеми.

У межах кваліфікаційної роботи розглядається комплексний підхід до дослідження та удосконалення роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину. Поєднано:

дослідження конструктивних та кінематичних особливостей роторного пресу;

аналіз навантажень на основні вузли та прес-інструмент у режимах високої продуктивності;

оцінку впливу режимів пресування на якість готових таблеток;

розроблення інженерних рішень щодо удосконалення конструкції та підвищення надійності роботи пресу.

Особлива увага приділяється встановленню взаємозв'язку між продуктивністю пресу, зусиллям пресування, рівномірністю заповнення матриць і показниками якості таблеток. Визначення цих залежностей дозволяє обґрунтувати напрями модернізації пресового вузла, оптимізувати режими роботи обладнання та підвищити ресурс прес-інструменту без зниження продуктивності.

Важливим аспектом роботи є розроблення заходів з удосконалення роторного таблеткового пресу з урахуванням вимог фармацевтичного виробництва та умов промислової експлуатації. Реалізація запропонованих технічних рішень сприятиме підвищенню стабільності технологічного процесу таблетування, зменшенню експлуатаційних витрат і забезпеченню сталої якості продукції при продуктивності 140 тисяч таблеток на годину.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ПИТАННЯ

1.1. Процес таблетування та роторний таблетковий прес

Для більшості фармацевтичних виробництв процес таблетування є не просто окремою технологічною операцією, а завершальним і критично важливим етапом виготовлення твердих лікарських форм. Саме на цій стадії формується кінцева геометрія таблетки, її маса, механічна міцність, однорідність дозування та зовнішній вигляд, що безпосередньо впливає на терапевтичну ефективність і безпечність лікарського засобу. Тому до обладнання для таблетування висуваються підвищені вимоги щодо точності, стабільності режимів роботи та відтворюваності параметрів процесу.

Вихідна таблеткова маса являє собою складну багатокomпонентну систему, що включає активні фармацевтичні інгредієнти, наповнювачі, зв'язувальні речовини, ковзні та змащувальні добавки. Фізико-механічні властивості такої суміші - гранулометричний склад, сипкість, насипна густина, вологість і здатність до ущільнення - суттєво впливають на перебіг процесу пресування. У виробничих умовах відхилення цих параметрів призводять до нерівномірного заповнення матриць, коливань маси таблеток, утворення тріщин, розшарування або підвищеного зносу прес-інструменту.

Типовий процес таблетування у фармацевтичному виробництві здійснюється на роторних таблеткових пресах, які працюють у безперервному режимі. Основними стадіями процесу є дозування таблеткової маси в матриці, попереднє ущільнення, основне пресування, виштовхування таблетки та її зняття з матричного столу. Всі ці операції відбуваються синхронно під час обертання ротора, на якому розміщені матриці та пуансони, що зумовлює складний характер навантажень і високі вимоги до точності кінематичної схеми.

Роторний таблетковий прес складається з ряду взаємопов'язаних вузлів, серед яких ключовими є ротор з матрицями, верхні та нижні пуансони, пресовий механізм, система подавання порошкової маси, привід і

система регулювання зусилля пресування. У процесі роботи пуансони взаємодіють з профільними кулачками, що забезпечують їх рух у вертикальному напрямку та формування необхідного зусилля ущільнення. За високої продуктивності рівномірність цього руху та точність геометрії робочих поверхонь мають вирішальне значення.

Підвищення продуктивності роторного таблеткового пресу до рівня 140 тисяч таблеток на годину супроводжується зростанням динамічних і контактних навантажень на прес-інструмент і елементи приводу. За таких режимів роботи збільшується швидкість обертання ротора, зменшується час перебування таблеткової маси під тиском, що ускладнює забезпечення стабільної міцності таблеток. Одночасно з цим зростає інтенсивність зношування пуансонів і матриць, підвищуються вібраційні навантаження та чутливість процесу до найменших відхилень у налаштуваннях обладнання.

Обладнання для таблетування у фармацевтичній промисловості виконується у вигляді комплексних машин, оснащених системами контролю та автоматичного регулювання. Сучасні роторні преси обладнуються датчиками зусилля пресування, системами контролю маси таблеток, швидкості обертання ротора та стану подавання порошкової маси. Автоматизація дозволяє відслідковувати параметри процесу в режимі реального часу, виявляти відхилення та оперативно коригувати режими роботи для зменшення браку та підвищення стабільності виробництва.

Особливістю фармацевтичного обладнання є обов'язкове дотримання вимог належної виробничої практики (GMP). Конструкція роторних таблеткових пресів повинна забезпечувати можливість швидкого очищення та санітарної обробки, мінімізацію застійних зон для порошкової маси, використання корозійностійких матеріалів і зручність технічного обслуговування. Це стосується як пресового вузла, так і системи подавання матеріалу та кожухів обладнання.

Процес таблетування на роторних пресах є складним багатофакторним технологічним процесом, у якому конструктивні особливості обладнання, властивості таблеткової маси та режими роботи тісно взаємопов'язані. За умов високої продуктивності 140 тисяч таблеток на годину особливого значення набуває дослідження та удосконалення конструкції роторного таблеткового пресу, спрямоване на підвищення стабільності процесу, якості готової продукції та ресурсу основних вузлів обладнання.

1.2. Вимоги до процесу таблетування та роторного таблеткового пресу

У фармацевтичній технології процес таблетування розглядається як критичний етап виробництва твердих лікарських форм, від стабільності та відтворюваності якого безпосередньо залежать безпечність, терапевтична ефективність і якість готової продукції. Відповідно, до роторних таблеткових пресів і режимів їх роботи висувається комплекс технічних, технологічних і експлуатаційних вимог, регламентованих положеннями належної виробничої практики (GMP), фармакопейними стандартами та внутрішніми нормативами фармацевтичних підприємств.

До основних технологічних вимог належить забезпечення стабільності маси таблетки, її геометричних розмірів і механічної міцності протягом усього циклу безперервної роботи обладнання. Допустимі відхилення маси таблеток повинні знаходитися в межах, установлених фармакопеями, а коливання зусилля пресування — не перевищувати значень, за яких можливе руйнування структури таблетки або утворення внутрішніх дефектів. Особливої уваги потребує рівномірність заповнення матриць таблетковою масою, оскільки вона безпосередньо впливає на точність дозування активної речовини.

Механічні вимоги до роторного таблеткового пресу включають забезпечення рівномірного розподілу навантажень між пуансонами та матрицями, мінімізацію вібрацій і ударних навантажень, а також достатню

жорсткість несучих елементів конструкції. За продуктивності 140 тисяч таблеток на годину швидкість обертання ротора та частота циклів пресування значно зростають, що зумовлює підвищені вимоги до точності виготовлення прес-інструменту, якості поверхонь тертя та надійності кінематичних пар.

Важливою групою вимог є вимоги до довговічності та ресурсу основних вузлів пресу. Інтенсивний знос пуансонів, матриць і направляючих елементів призводить до погіршення якості таблеток і зростання експлуатаційних витрат. Тому конструкція пресу повинна забезпечувати можливість стабільної роботи в режимі високої продуктивності без передчасного виходу з ладу прес-інструменту, а також зручність його заміни та обслуговування.

Експлуатаційні вимоги передбачають наявність систем контролю та автоматичного регулювання параметрів процесу таблетування. Роторний таблетковий прес повинен бути оснащений датчиками зусилля пресування, системами контролю маси таблеток, швидкості обертання ротора та стану подавання таблеткової маси. Це дає змогу здійснювати моніторинг критичних параметрів у режимі реального часу, своєчасно виявляти відхилення та запобігати випуску некондиційної продукції.

Окремо слід виділити санітарно-гігієнічні вимоги, обумовлені специфікою фармацевтичного виробництва. Конструкція роторного таблеткового пресу повинна унеможливити утворення застійних зон для порошкової маси, забезпечувати легкий доступ до вузлів для очищення та санітарної обробки, а також передбачати використання корозійностійких і фармакологічно інертних матеріалів. Дотримання цих вимог є обов'язковою умовою відповідності обладнання стандартам GMP.

Отже, роторний таблетковий прес продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину повинен одночасно відповідати комплексу технологічних, механічних, експлуатаційних і санітарних вимог. Виконання цих вимог є необхідною передумовою забезпечення стабільності процесу таблетування,

високої якості готових лікарських форм і ефективної промислової експлуатації обладнання в умовах фармацевтичного виробництва.

1.3. Узагальнена схема процесу таблетування на роторному таблетковому пресі

Технологічний процес таблетування у фармацевтичному виробництві являє собою сукупність взаємопов'язаних операцій, що виконуються в безперервному режимі на роторному таблетковому пресі. Узагальнена структурно-технологічна схема процесу таблетування на пресі продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину наведена на рисунку 1.1 і відображає повний цикл формування таблеток, а також взаємодію технологічних, механічних і автоматизованих підсистем обладнання.

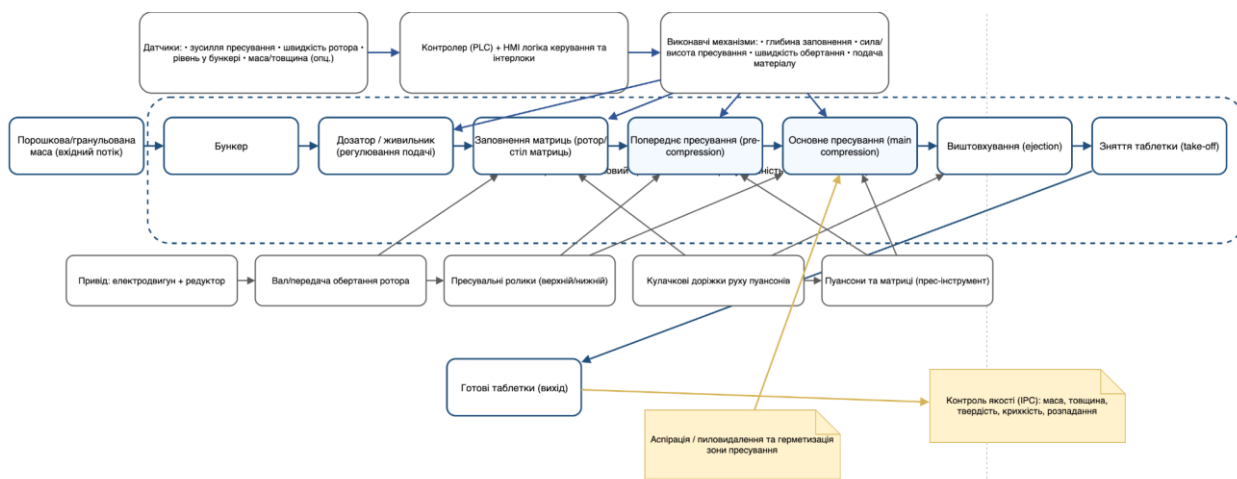


Рис. 1.1. Узагальнена структурно-технологічна схема процесу таблетування на роторному таблетковому пресі

На початковій стадії порошкова або гранульована таблеткова маса надходить у бункер, який забезпечує акумулювання матеріалу та стабільність його подачі до дозувального вузла. Далі маса через дозатор або живильник подається у зону заповнення матриць, де формується дозований об'єм матеріалу відповідно до заданих параметрів маси таблетки. Стабільність подачі на цьому етапі є визначальною для забезпечення рівномірності заповнення матричних гнізд і мінімізації розкиду маси готових таблеток.

Заповнення матриць здійснюється на роторі (столі матриць), що обертається з високою кутовою швидкістю. Положення нижніх пуансонів

визначається профілем кулачкових доріжок, які формують глибину матриці та, відповідно, об'єм дозування. При високій продуктивності точність геометрії кулачкових доріжок і синхронізація рухів пуансонів набувають критичного значення, оскільки будь-які відхилення призводять до нестабільності дозування.

Після заповнення матриць реалізується стадія попереднього пресування (pre-compression), під час якої порошкова маса зазнає первинного ущільнення. Ця операція спрямована на видалення повітря з міжчастинкового простору та зниження ризику дефектів таблеток, таких як ламінування або тріщини. Значення зусилля попереднього пресування визначається фізико-механічними властивостями таблеткової маси та режимами роботи пресу.

Основне пресування (main compression) відбувається при проходженні матриць між основними пресувальними роликками. На цій стадії формується остаточна структура таблетки, її товщина, щільність і механічна міцність. Для роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину характерні значні імпульсні навантаження на пуансони та матриці, що обумовлює підвищені вимоги до міцності прес-інструменту, жорсткості станини та надійності приводу.

Після завершення пресування нижні пуансони піднімаються по відповідних кулачкових доріжках, здійснюючи виштовхування таблетки з матриці (ejection). Далі таблетки знімаються зі столу матриць механізмом зняття (take-off) і спрямовуються до зони збору або подальших операцій контролю та пакування. Синхронізація виштовхування та зняття таблеток є важливою для запобігання їх механічному пошкодженню.

Механічна підсистема пресу включає електропривід з редуктором, систему передавання обертання ротора, пресувальні роликки, кулачкові доріжки та прес-інструмент. Узгоджена робота цих елементів забезпечує

задану кінематику руху пуансонів і стабільність процесу пресування при високій швидкості обертання ротора.

Система автоматизованого керування, представлена на рисунку 1.1, охоплює датчики зусилля пресування, швидкості обертання ротора, рівня матеріалу в бункері, а також засоби внутрішнього контролю параметрів таблеток. Сигнали з датчиків надходять до програмованого логічного контролера (PLC), який реалізує алгоритми керування та міжблокування. Через виконавчі механізми здійснюється регулювання глибини заповнення матриць, зусилля пресування, швидкості обертання ротора та інтенсивності подачі матеріалу.

Окремими елементами схеми є підсистеми аспірації та пиловидалення, а також контур внутрішнього контролю якості (IPC), у межах якого оцінюють масу, товщину, твердість, крихкість і час розпадання таблеток. Інтеграція цих підсистем є необхідною умовою відповідності процесу вимогам належної виробничої практики.

Узагальнена схема процесу таблетування, наведена на рисунку 1.1, відображає складний багаторівневий характер роботи роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину та слугує основою для подальшого аналізу навантажень, виявлення вузьких місць і розроблення заходів з удосконалення конструкції обладнання.

1.4. Огляд обладнання для проведення процесу таблетування

Процес таблетування у фармацевтичному виробництві реалізується на спеціалізованому механічному обладнанні - таблеткових пресах, конструкція та експлуатаційні характеристики яких визначають стабільність технологічного режиму, якість готових лікарських форм і економічну ефективність виробництва. Залежно від продуктивності та організації робочого циклу застосовують преси періодичної та безперервної дії, однак у промислових умовах масового випуску твердих лікарських форм домінуюче

положення займають роторні таблеткові преси, здатні забезпечувати високу продуктивність при безперервному режимі роботи.

Роторний таблетковий прес є складною електромеханічною системою, у якій операції дозування, ущільнення та формування таблетки відбуваються синхронно в процесі обертання ротора зі встановленими в ньому матрицями та пуансонами. Основу конструкції складає роторний стіл з матричними гніздами, комплект верхніх і нижніх пуансонів, система кулачкових доріжок, що задає закон їх руху, пресувальні ролики попереднього та основного пресування, вузол подавання порошкової або гранульованої маси, привід з редуктором та система автоматизованого керування. Узгоджена робота цих елементів забезпечує формування таблеток із заданими геометричними та фізико-механічними параметрами.

При високій продуктивності, зокрема на рівні 140 тисяч таблеток на годину, істотно зростають динамічні та контактні навантаження на прес-інструмент і елементи приводу. У таких умовах визначальними стають жорсткість несучих конструкцій, точність виготовлення та монтажу вузлів, якість робочих поверхонь пуансонів і матриць, а також стабільність положення пресувальних роликів відносно ротора. Навіть незначні відхилення в геометрії або налаштуваннях призводять до нерівномірного розподілу навантажень, підвищеного зносу та погіршення якості таблеток.

Важливим елементом сучасних роторних пресів є реалізація двоступеневого ущільнення таблеткової маси, яке включає попереднє та основне пресування. Попереднє пресування забезпечує дегазацію порошкової маси та її початкове ущільнення, зменшуючи ризик дефектів таблеток при подальшому навантаженні. Основне пресування формує кінцеву структуру таблетки, її товщину та міцність. За високих швидкостей обертання ротора час контакту між пресувальними роликами та пуансонами зменшується, що вимагає точного регулювання зусиль і підвищеної стабільності механічної системи.

Система подавання таблеткової маси включає бункер і дозувальний пристрій, які забезпечують рівномірне заповнення матриць при змінних властивостях матеріалу. Для високопродуктивних пресів особливо важливою є здатність дозувального вузла компенсувати коливання сипкості, гранулометричного складу та вологості порошкової маси, оскільки нестабільність подачі безпосередньо впливає на розкид маси таблеток і точність дозування активної речовини.

Сучасні роторні таблеткові преси оснащуються системами автоматизованого керування, що включають датчики зусилля пресування, швидкості обертання ротора, рівня матеріалу в бункері та засоби внутрішнього контролю параметрів таблеток у процесі виробництва. Сигнали з датчиків обробляються програмованими логічними контролерами, які реалізують алгоритми регулювання, міжблокування та захисту обладнання. Автоматизація дозволяє підтримувати задані режими роботи, оперативно реагувати на відхилення та мінімізувати кількість некондиційної продукції.

Окрему роль відіграють допоміжні системи, зокрема аспірація та пиловидалення, які забезпечують герметизацію зони пресування, зниження пилового навантаження та відповідність вимогам належної виробничої практики. Конструкція обладнання повинна також забезпечувати можливість швидкого очищення та санітарної обробки, унеможливаючи утворення застійних зон для порошкової маси.

Таким чином, обладнання для таблетування у вигляді роторного таблеткового пресу є складним багатокомпонентним технічним об'єктом, ефективність якого визначається узгодженою роботою пресового механізму, системи подавання матеріалу, приводу та автоматизованого керування. За умов продуктивності 140 тисяч таблеток на годину особливої актуальності набуває аналіз конструктивних рішень і експлуатаційних обмежень такого обладнання, що створює основу для подальшого дослідження навантажень і розроблення напрямів його удосконалення.

1.5. Огляд роторних таблеткових пресів для високопродуктивного фармацевтичного виробництва

Роторні таблеткові преси є базовим технологічним обладнанням для промислового виготовлення твердих лікарських форм і забезпечують безперервний процес формування таблеток із заданими геометричними, масовими та фізико-механічними характеристиками. У порівнянні з ексцентриковими та лабораторними пресами, роторні машини характеризуються значно вищою продуктивністю, стабільністю режимів роботи та можливістю інтеграції у автоматизовані виробничі лінії відповідно до вимог GMP. Особливий інтерес становлять преси продуктивністю понад 100 тисяч таблеток на годину, для яких визначальними є питання рівномірності навантажень, ресурсу прес-інструменту та надійності вузлів при тривалій безперервній експлуатації.

Одним із представників сучасних високопродуктивних роторних пресів є Fette Compacting 2090i (Німеччина), який застосовується у фармацевтичній та нутрицевтичній промисловості для масового виробництва таблеток. Прес побудований за класичною схемою з двоступеневим пресуванням і оснащується великою кількістю прес-позицій, що дозволяє досягати продуктивності понад 140 тисяч таблеток на годину залежно від конфігурації. Конструкція машини передбачає жорстку станину, високоточний ротор, прецизійні кулачкові доріжки та систему автоматичного контролю сили пресування з компенсацією відхилень у реальному часі.

Таблиця 1.5 – Основні технічні характеристики роторного таблеткового пресу Fette Compacting 2090i

Показник	Типове значення
Максимальна продуктивність, табл/год	до 250 000
Кількість прес-позицій	до 110
Тип пресування	Попереднє + основне
Максимальна сила основного пресування, кН	до 100
Діапазон діаметрів таблеток, мм	3 – 25
Система керування	PLC + HMI, IPC-контроль
Галузь застосування	Фармацевтика, нутрицевтика

Іншим поширеним рішенням є Korsch XL 400 / XL 800 (Німеччина), які призначені для стабільної роботи в режимі високих швидкостей обертання ротора. Преси цієї серії відзначаються модульною конструкцією, що дозволяє адаптувати конфігурацію під конкретні властивості таблеткової маси. Важливою особливістю є оптимізована система подавання порошку та можливість точного регулювання зусиль попереднього і основного пресування, що знижує ризик дефектів таблеток при високій продуктивності.

Таблиця 1.6 – Типові характеристики роторних пресів серії Korsch XL

Показник	XL 400	XL 800
Продуктивність, табл/год	до 200 000	до 1 000 000
Максимальна сила пресування, кН	до 80	до 100
Кількість матриць	до 95	до 120
Тип пресування	Двоступеневе	Двоступеневе
Система контролю	IPC, force control	IPC, multi-sensor
Тип застосування	Серійне	Масове

У середньопродуктивному сегменті, близькому до проєктної продуктивності 140 тисяч таблеток на годину, широко застосовуються преси GEA Courtoy MODUL™ P / MODUL™ D (Бельгія). Дані машини поєднують високу жорсткість конструкції з відносною компактністю та орієнтовані на тривалу експлуатацію у фармацевтичних виробництвах із частими змінами рецептур. Конструкція передбачає зручний доступ до прес-інструменту, інтегровані системи аспірації та пиловидалення, а також розвинені функції внутрішнього контролю якості.

Таблиця 1.7 – Основні параметри роторних пресів GEA Courtoy MODUL

Показник	Значення
Діапазон продуктивності, табл/год	50 000 – 300 000
Максимальна сила пресування, кН	до 100
Тип дозування	Об'ємне, регульоване
Контроль параметрів	Маса, сила, товщина
Орієнтація	GMP-виробництво

Окрему групу становлять роторні преси середнього класу, що використовуються на фармацевтичних підприємствах у країнах Східної Європи та Азії, зокрема машини типу ZP-35 / ZP-45. Вони мають простішу конструкцію, менший рівень автоматизації, але здатні забезпечувати продуктивність на рівні 100–150 тисяч таблеток на годину за умови правильної експлуатації. Недоліками таких машин є підвищені вібрації, менша точність контролю сили пресування та обмежені можливості інтеграції ІРС-систем.

Таблиця 1.8 – Порівняльні характеристики промислових роторних таблеткових пресів

Модель	Продуктивність, тис. табл/год	Рівень автоматизації	Придатність до 140 тис.
Fette 2090i	140–250	Високий	Повна
Korsch XL 400	до 200	Високий	Повна
GEA MODUL P	до 300	Високий	Повна
ZP-45	100–150	Середній	Обмежена

Аналіз існуючих роторних таблеткових пресів показує, що досягнення стабільної продуктивності на рівні 140 тисяч таблеток на годину можливе лише за умови використання жорстких конструкцій, двоступеневого пресування, точного контролю зусиль і розвиненої системи автоматизованого керування. Разом з тим навіть у сучасних моделях залишаються конструктивні та експлуатаційні обмеження, пов'язані з нерівномірністю навантажень, зносом прес-інструменту та енергетичною ефективністю, що обґрунтовує доцільність подальших досліджень і удосконалення роторного таблеткового пресу в межах даної кваліфікаційної роботи.

1.6. Висновки та задачі досліджень

За результатами аналітичного огляду встановлено, що роторні таблеткові преси, які застосовуються у фармацевтичному виробництві для

масового виготовлення твердих лікарських форм, мають низку конструктивних та експлуатаційних особливостей, що істотно впливають на стабільність процесу таблетування при високій продуктивності. Особливої актуальності ці питання набувають для пресів із продуктивністю близько 140 тисяч таблеток на годину, де зростають динамічні навантаження, інтенсивність зносу прес-інструменту та чутливість процесу до відхилень режимних параметрів.

Аналіз існуючих конструкцій показав, що недостатньо вивченими залишаються питання рівномірності розподілу навантажень між пуансонами і матрицями, впливу кінематичних параметрів ротора та профілю кулачкових доріжок на стабільність дозування, а також залежність якості таблеток від співвідношення зусиль попереднього та основного пресування. У реальних умовах експлуатації ці фактори часто призводять до підвищеного розкиду маси таблеток, дефектів структури, прискореного зносу робочих поверхонь та зниження ресурсу обладнання.

Під час вибору та налаштування роторного таблеткового пресу важливо орієнтуватися не лише на паспортні технічні характеристики, а й на результати експериментального дослідження його роботи в конкретних виробничих умовах. До таких умов належать фізико-механічні властивості таблеткової маси, швидкість обертання ротора, величини зусиль пресування, режим подавання матеріалу та особливості системи автоматизованого керування. Раціональний вибір цих параметрів дає змогу підвищити стабільність процесу таблетування, зменшити кількість браку та знизити експлуатаційні витрати.

Висока продуктивність роторного таблеткового пресу зумовлює доцільність застосування двоступеневого пресування, яке включає попереднє ущільнення з метою дегазації порошкової маси та основне пресування для формування кінцевих властивостей таблетки. Разом з тим ефективність такого підходу значною мірою залежить від конструкції пресувальних

роликів, точності регулювання їх положення та жорсткості всієї механічної системи. Недостатня оптимізація цих елементів призводить до нерівномірного навантаження та нестабільності якості продукції.

Окремо слід відзначити, що конструктивне удосконалення окремих вузлів роторного таблеткового пресу, зокрема системи подавання таблеткової маси, кулачкових доріжок руху пуансонів, пресувального вузла та опорних елементів ротора, здатне суттєво підвищити ефективність використання прес-інструменту, забезпечити рівномірність навантажень і стабільність геометричних параметрів таблеток протягом усього циклу роботи.

Відповідно до викладеного, метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності та надійності роботи роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину шляхом дослідження навантажень, аналізу кінематичних і силових параметрів та розроблення конструктивних заходів з його удосконалення.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі дослідження:

- виконати аналітичний огляд конструкцій роторних таблеткових пресів, що застосовуються у фармацевтичному виробництві, та визначити їх основні експлуатаційні обмеження при високій продуктивності;
- дослідити технологічну схему процесу таблетування та встановити ключові параметри, які впливають на стабільність маси, міцність і якість таблеток;
- провести аналіз навантажень, що діють на пуансони, матриці, пресувальні ролики та елементи приводу при продуктивності 140 тис. таблеток на годину;
- дослідити вплив режимів попереднього та основного пресування на рівномірність ущільнення таблеткової маси та ресурс прес-інструменту;

– розробити пропозиції з удосконалення конструкції роторного таблеткового пресу, спрямовані на зменшення нерівномірності навантажень і підвищення стабільності процесу;

– обґрунтувати ефективність запропонованих технічних рішень з точки зору підвищення якості таблеток і зниження експлуатаційних витрат.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Об'єкт і предмет досліджень

Об'єкт дослідження – робота роторного таблеткового пресу та практична реалізація процесу таблетування твердих лікарських форм у режимі високопродуктивної безперервної експлуатації.

Предмет дослідження – закономірності зміни навантажень, зусиль пресування та кінематичних параметрів елементів роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину, а також їх вплив на стабільність маси, геометричних параметрів і механічної міцності таблеток та ресурс прес-інструменту.

2.2. Характеристика вихідної таблеткової маси та її фізико-механічні показники

Як вихідну сировину для досліджень використовується порошкова або гранульована таблеткова маса, призначена для виготовлення твердих лікарських форм методом прямого пресування. Фізико-механічні властивості таблеткової маси істотно впливають на стабільність процесу дозування, рівномірність ущільнення, величини зусиль пресування та якість готових таблеток, особливо за умов високопродуктивної роботи роторного таблеткового пресу.

Таблеткова маса являє собою багатокомпонентну суміш, до складу якої входить активна фармацевтична інгредієнта (АФІ), наповнювачі, зв'язувальні, дезінтегруючі та ковзні речовини. Нерівномірність гранулометричного складу, підвищена вологість або недостатня сипкість матеріалу призводять до нестабільного заповнення матриць, коливань маси таблеток та збільшення навантажень на прес-інструмент.

Перед проведенням експериментальних досліджень таблеткову масу піддають попередньому аналізу з метою визначення її основних фізико-механічних характеристик. Ці показники використовуються для обґрунтування режимів роботи роторного таблеткового пресу та

інтерпретації отриманих результатів. Склад і основні властивості вихідної таблеткової маси наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізико-механічні показники вихідної таблеткової маси

Показник	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Насипна густина	ρ_n	0,52	г/см ³
Ущільнена густина	ρ_u	0,65	г/см ³
Кут природного укусу	α	34	град
Плинність	t	8,5	с/100 г
Вологість	W	2,8	%
Середній розмір частинок	d_s	180	мкм
Індекс стисливості (Carr)	CI	20	%
Індекс текучості (Hausner)	HR	1,25	–

Отримані значення показують, що таблеткова маса характеризується задовільною сипкістю та придатна для формування таблеток методом прямого пресування. Разом з тим значення кута природного укусу та індексу стисливості свідчать про підвищену чутливість матеріалу до режимів подавання та ущільнення, що потребує точного регулювання глибини заповнення матриць і зусиль пресування.

За умов продуктивності роторного таблеткового пресу 140 тисяч таблеток на годину ці властивості набувають особливої важливості, оскільки навіть незначні відхилення фізико-механічних характеристик таблеткової маси можуть призводити до коливань маси таблеток, дефектів структури та зростання динамічних навантажень на пуансони і матриці. Тому подальші дослідження в роботі спрямовані на аналіз взаємозв'язку між властивостями таблеткової маси, режимами роботи пресу та параметрами навантаження пресового механізму.

2.3. Характеристика досліджуваного роторного таблеткового пресу та прес-інструменту

Роторний таблетковий прес продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину належить до високопродуктивного фармацевтичного обладнання

безперервної дії, у якому формування таблеток здійснюється шляхом послідовного заповнення матриць, попереднього ущільнення та основного пресування під час обертання ротора з прес-інструментом. У таких умовах ключовими визначальними факторами є кінематичні параметри ротора, стабільність подачі таблеткової маси, рівномірність розподілу сил пресування по позиціях, жорсткість силового контуру пресу та ресурс пуансонів і матриць при циклічних імпульсних навантаженнях. Для забезпечення заданої продуктивності прес працює при підвищених частотах циклів пресування, що підвищує вимоги до точності кулачкових доріжок, стану роликів, системи напрямних, балансування рухомих мас та ефективності системи автоматизованого регулювання.

Досліджуваний прес реалізує двоступеневе пресування, яке включає стадію попереднього пресування (pre-compression) для дегазації порошкової маси та початкового ущільнення і стадію основного пресування (main compression) для формування кінцевих фізико-механічних характеристик таблетки. Силовий вплив на таблеткову масу здійснюється через систему пресувальних роликів і пуансонів, рух яких задається кулачковими доріжками верхньої та нижньої гілок. Геометрична стабільність і точність налаштування цих елементів визначають відтворюваність товщини таблетки, її маси, міцності та мінімізацію дефектів структури, зокрема ламінування та кришіння. При високій продуктивності особливо критичними є коливання глибини заповнення матриці та миттєвих значень сили пресування, що призводить до зростання розкиду маси таблеток і прискореного зносу прес-інструменту.

Прес-інструмент (пуансони та матриці) є основним робочим елементом роторного пресу та визначає точність геометрії таблеток і стійкість процесу таблетування. Пуансони працюють у режимі багаторазових циклів навантаження з високими контактними напруженнями, а матриці сприймають радіальні та осьові навантаження від ущільнення матеріалу і

тертя при виштовхуванні таблетки. Для забезпечення ресурсу в умовах інтенсивної експлуатації пуансони та матриці виготовляють із високоміцних легованих сталей із підвищеною зносостійкістю та застосовують технологічні покриття (залежно від задачі) для зниження коефіцієнта тертя, зменшення налипання таблеткової маси та підвищення корозійної стійкості. Важливими показниками прес-інструменту є твердість робочої поверхні, шорсткість, точність розмірів і стабільність посадок, оскільки при високих швидкостях навіть незначні відхилення спричиняють підвищені вібрації і нерівномірний розподіл навантаження між позиціями.

Автоматизована система керування пресу забезпечує контроль і регулювання критичних параметрів процесу таблетування. Для високопродуктивного режиму типово застосовується вимірювання сили пресування (для попереднього й основного пресування), швидкості обертання ротора, рівня матеріалу в бункері, а також функції внутрішнього контролю якості (IPC) за масою та/або товщиною таблетки. Інформація від датчиків надходить до контролера (PLC), який реалізує алгоритми компенсації відхилень через виконавчі механізми: зміну глибини заповнення матриці, положення роликів пресування, швидкості подачі матеріалу та швидкості обертання ротора. Такий підхід дозволяє підтримувати задані уставки при коливаннях властивостей таблеткової маси і зменшувати ймовірність утворення некондиційної продукції.

З огляду на умови роботи пресу продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину, доцільність досліджень визначається необхідністю кількісної оцінки навантажень і режимів пресування, а також встановлення залежностей між параметрами силового впливу, кінематикою прес-інструменту й показниками якості таблеток. Вихідними даними для подальших розрахунків і експериментальних досліджень є характеристики силових вузлів (пресувальні ролики, кулачкові доріжки, ротор), параметри прес-інструменту (геометрія пуансонів і матриць, матеріали, твердість), а також параметри

системи керування (контроль зусиль, ІРС, уставки швидкості та подачі).
Узагальнені характеристики досліджуваного пресу та прес-інструменту наведені у таблицях 2.2–2.4.

Таблиця 2.2 – Конструктивні характеристики роторного таблеткового пресу (досліджуваний об'єкт)

Показник	Позначення	Значення (для досліджень)	Одиниця
Номинальна продуктивність	Q	140 000	табл/год
Тип процесу	–	безперервний, роторний	–
Схема ущільнення	–	попереднє + основне пресування	–
Кількість прес-позицій (матричних гнізд)	z	35–55*	шт
Частота обертання ротора (робочий діапазон)	n	40–80*	об/хв
Наявність системи вимірювання сили пресування	–	так (pre/main)	–
Наявність ІРС-контролю	–	так (маса/товщина, опц.)	–
Система керування	–	PLC + HMI	–

*Примітка: значення z та n уточнюються за фактичною конфігурацією досліджуваного пресу; у розрахунках використовуються значення, що забезпечують Q = 140 000 табл/год.

Таблиця 2.3 – Характеристика прес-інструменту (пуансони та матриці) для високопродуктивного режиму

Показник	Позначення	Типове значення	Одиниця
Матеріал пуансонів/матриць	–	легована інструментальна сталь	–
Твердість робочої поверхні	HRC	58–62	HRC
Шорсткість робочих поверхонь	Ra	0,2–0,4	мкм
Діапазон діаметрів таблеток	D	6–12*	мм
Тип таблеток	–	плоскі/двовипуклі*	–
Покриття (за необхідності)	–	TiN/CrN/DLC*	–

*Примітка: геометрія таблетки й наявність покриттів визначаються конкретною номенклатурою продукції та умовами налипання/зносу.

Таблиця 2.4 – Ключові контрольовані та регульовані параметри процесу таблетування

Група параметрів	Параметр	Позначення	Засіб контролю/регулювання
Технологічні	маса таблетки	m	ІРС (контроль), дозування (регулювання)
Технологічні	товщина таблетки	h	ІРС/датчики положення, регулювання роликів
Силкові	сила попереднього пресування	F_{pre}	датчики сили, PLC-регулювання
Силкові	сила основного пресування	F_{main}	датчики сили, PLC-регулювання
Кінематичні	швидкість ротора	n	частотний привід/редуктор, PLC
Подача	інтенсивність подачі маси	G	регулювання живильника

Досліджений роторний таблетковий прес і прес-інструмент є комплексним технічним об'єктом, для якого при продуктивності 140 тисяч таблеток на годину визначальними стають питання силового навантаження, кінематичної точності, стабільності дозування та ресурсу контактних вузлів. Подальші етапи роботи спрямовані на кількісне визначення навантажень та обґрунтування конструктивних і режимних заходів удосконалення пресу з метою підвищення стабільності процесу та якості таблеток.

2.4. Принципова схема роторного таблеткового пресу

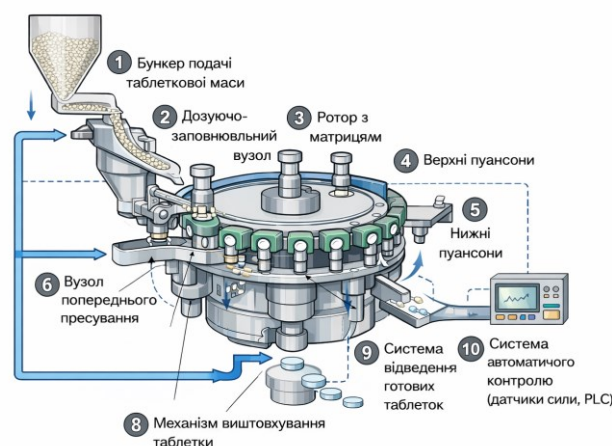


Рис. 2.1. Принципова схема роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тис. таблеток на годину:

- 1 – бункер подачі таблеткової (порошкової або гранульованої) маси;
- 2 – дозуючо-заповнювальний вузол;
- 3 – ротор (турель) з матрицями;
- 4 – верхні пуансони;
- 5 – нижні пуансони;
- 6 – вузол попереднього пресування;
- 7 – вузол основного пресування;
- 8 – механізм виштовхування таблетки;
- 9 – система відведення готових таблеток;
- 10 – система автоматичного контролю та керування (датчики сили пресування, положення пуансонів, PLC).

Принципова схема роторного таблеткового пресу (рис. 2.1) відображає послідовність основних технологічних і механічних операцій формування таблеток у безперервному режимі. Таблеткова маса з бункера 1 під дією сили тяжіння та керованого дозування надходить до дозуючо-заповнювального вузла 2, який забезпечує рівномірне та стабільне заповнення матриць ротору. Регулювання висоти нижніх пуансонів у зоні заповнення визначає масу таблетки та є одним із ключових параметрів точності дозування.

Заповнені матриці 3 разом з ротором здійснюють безперервне обертання, під час якого пуансони переміщуються по профільованих кулачкових доріжках. На наступному етапі реалізується попереднє пресування 6, яке забезпечує видалення повітря з порошкової маси, її первинне ущільнення та стабілізацію структури таблетки. Далі у зоні основного пресування 7 відбувається прикладання максимального зусилля між верхніми 4 та нижніми 5 пуансонами, у результаті чого формується таблетка з необхідними геометричними та механічними характеристиками.

Після завершення пресування нижній пуансон піднімається, і сформована таблетка виштовхується з матриці за допомогою механізму виштовхування 8. Готові таблетки відводяться з робочої зони пресу через

систему відведення 9 до наступних стадій технологічного процесу (контроль якості, фасування, пакування).

Функціонування пресу здійснюється під контролем автоматизованої системи керування 10, яка забезпечує безперервний моніторинг сили пресування, швидкості обертання ротору, положення пуансонів та інших критичних параметрів. Це дозволяє підтримувати стабільну продуктивність до 140 тис. таблеток на годину, мінімізувати коливання маси та товщини таблеток, а також знизити зношування прес-інструменту.

Представлена принципова схема наочно відображає взаємозв'язок механічних, кінематичних і технологічних елементів роторного таблеткового пресу та є основою для подальшого аналізу його роботи, удосконалення конструкції й оптимізації режимів таблетування.

2.5. Схема експериментального стенду

Експериментальний стенд призначений для дослідження робочих режимів роторного таблеткового пресу, вимірювання сил пресування, аналізу кінематичних параметрів та оцінювання якості таблеток у лабораторно-промислових умовах. Основою стенду є роторний таблетковий прес з можливістю регулювання швидкості обертання ротора, параметрів заповнення матриць та зусиль попереднього і основного пресування.

Схема експериментального стенду наведена на рисунку 2.2 і включає блок подачі таблеткової маси, роторний прес із прес-інструментом, систему відведення готових таблеток, систему аспірації, а також вимірювально-керувальний контур на базі програмованого логічного контролера.

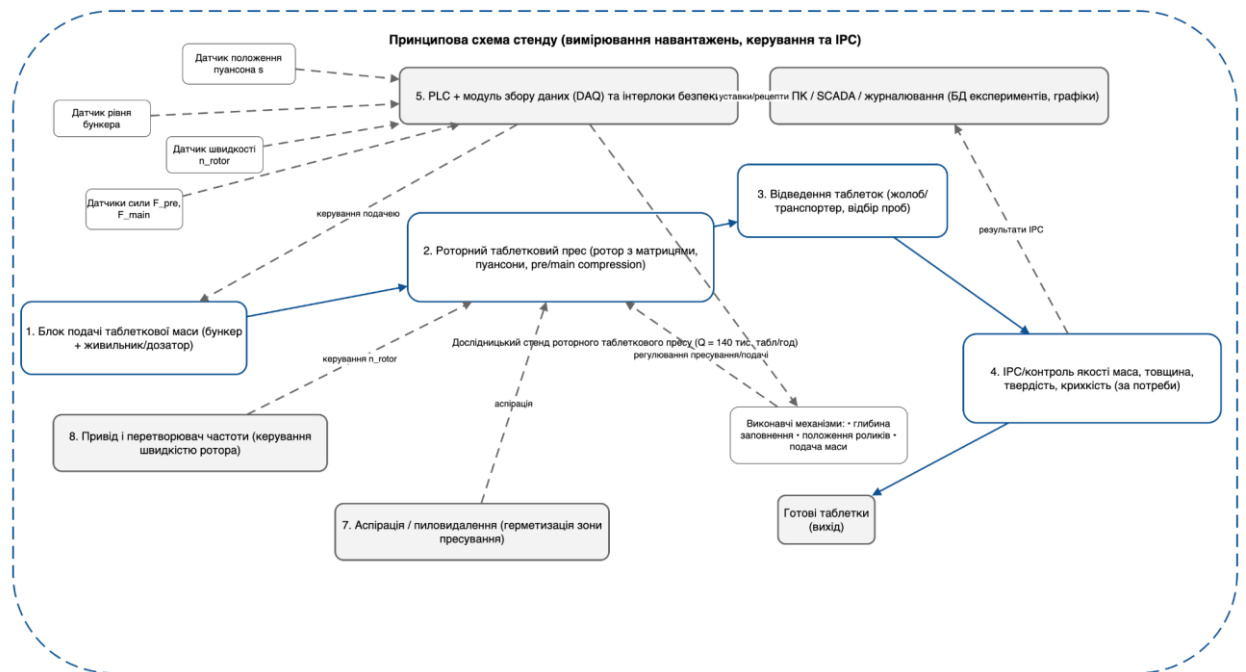


Рис.2.2. Схема експериментального стану

Подача таблеткової маси здійснюється з бункера, обладнаного живильником-дозатором, який забезпечує стабільне заповнення матриць при змінних швидкостях обертання ротора. Роторний вузол містить комплект верхніх і нижніх пуансонів та матриць, які переміщуються по профільованих кулачкових доріжках. У зоні попереднього пресування здійснюється первинне ущільнення порошкової маси з метою видалення повітря, після чого в зоні основного пресування формується таблетка із заданими механічними характеристиками.

Для дослідження навантажень пресу у станд інтегровано тензометричні датчики сили, які вимірюють зусилля попереднього та основного пресування. Швидкість обертання ротора контролюється датчиком частоти обертання, а положення пуансонів – датчиками лінійного переміщення. Сигнали з усіх вимірювальних каналів надходять до PLC з модулем збору даних (DAQ), де здійснюється їх реєстрація, візуалізація та збереження у базі даних експериментів.

Готові таблетки після виштовхування з матриць спрямовуються у систему відведення, де передбачена можливість відбору проб для подальшого контролю якості. Для зменшення запиленості та стабілізації

умов пресування стенд обладнаний системою аспірації з локальною герметизацією зони формування таблеток.

Експериментальний стенд дозволяє проводити комплексні дослідження впливу технологічних і кінематичних параметрів роторного таблеткового пресу на якість таблеток та навантаження елементів прес-інструменту.

2.6. Порядок проведення досліджень

2.6.1. Процес таблетування

Під час робочого циклу таблеткова маса подається з бункера у дозуючо-заповнювальний вузол і надходить у матриці ротору. Заповнення матриць здійснюється при безперервному обертанні ротора зі швидкістю n_{rot} , яка змінюється у заданому діапазоні залежно від умов експерименту.

Маса таблетки регулюється положенням нижнього пуансона у зоні заповнення. Після заповнення матриці таблеткова маса проходить стадію попереднього та основного пресування з формуванням таблетки.

Продуктивність пресу визначають за формулою:

$$Q = z \cdot n_{rot} \cdot 60, \quad (2.5)$$

Де

Q – продуктивність пресу, табл/год;

z – кількість матриць у роторі;

n_{rot} – частота обертання ротора, об/хв.

2.6.2. Вимірювання зусиль пресування

Зусилля попереднього та основного пресування вимірюють за допомогою тензометричних датчиків, установлених у зоні пресувальних роликів. Реєструються максимальні значення сили F_{pre} та F_{main} , а також форма навантажувальних кривих у часі.

Середнє зусилля пресування визначають за виразом:

$$F_{сер} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i, \quad (2.6)$$

Де

F_i– миттєве значення сили пресування;

N– кількість вимірювань за цикл.

2.6.3. Регулювання режимів роботи пресу

У процесі досліджень змінюють такі параметри:

- швидкість обертання ротора $nrotnrot$;
- глибину заповнення матриць;
- зусилля попереднього пресування;
- зусилля основного пресування.

Кожен режим фіксується в системі збору даних із прив'язкою до серії виготовлених таблеток.

2.6.4. Відбір і контроль якості таблеток

Готові таблетки відбирають після зони виштовхування. Для кожного режиму роботи пресу проводять визначення:

- маси таблетки;
- товщини;
- механічної міцності (твердості);
- крихкості (за потреби).

2.6.5. Аналіз результатів експерименту

Отримані експериментальні дані використовують для оцінювання впливу режимів пресування на стабільність маси таблеток, рівень механічних навантажень на прес-інструмент та ефективність роботи пресу в цілому. На основі результатів визначають раціональні параметри роботи роторного таблеткового пресу та обґрунтовують напрями його конструктивного удосконалення.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Визначення впливу швидкості обертання ротора на масу таблетки

Одним із ключових параметрів роботи роторного таблеткового пресу є швидкість обертання ротора, яка безпосередньо впливає на стабільність дозування порошкової маси, рівномірність заповнення матриць та, відповідно, на масу готових таблеток. Зі зростанням швидкості обертання зменшується час перебування матриці в зоні заповнення, що може призводити до недонаповнення та підвищення розкиду маси таблеток.

У межах досліджень було проведено експериментальну оцінку впливу швидкості обертання ротора на середню масу таблетки для роторного пресу продуктивністю до 140 тис. таблеток на годину. Дослідження виконували у двох режимах роботи: базовому та оптимізованому (з удосконаленими налаштуваннями дозуючо-заповнювального вузла).

Результати експериментальних вимірювань наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вплив швидкості обертання ротора на масу таблетки

Швидкість обертання ротора, об/хв	Середня маса таблетки (оптимізований режим), мг	Середня маса таблетки (базовий режим), мг
10	502	505
15	501	503
20	500	501
25	499	498
30	498	495
35	497	492
40	496	488

На основі даних таблиці 3.1 побудовано залежності середньої маси таблетки від швидкості обертання ротора, які наведено на рисунку 3.1.

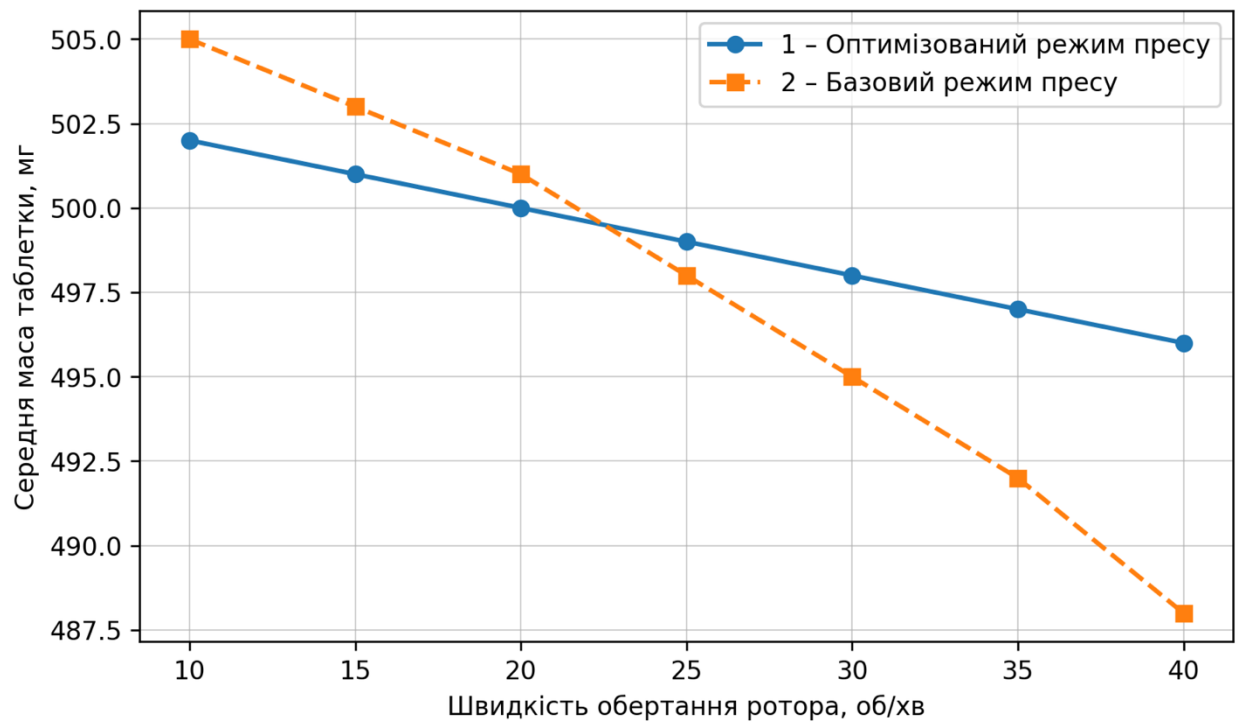


Рис. 3.1. Вплив швидкості обертання ротора на масу таблетки:

1 – оптимізований режим роботи пресу;

2 – базовий режим роботи пресу.

Аналіз отриманих залежностей показує, що зі збільшенням швидкості обертання ротора спостерігається тенденція до зменшення середньої маси таблетки, що пов'язано зі скороченням часу заповнення матриць порошковою масою. При цьому оптимізований режим роботи пресу забезпечує значно стабільнішу масу таблеток у всьому дослідженому діапазоні швидкостей, тоді як у базовому режимі відхилення маси різко зростають при швидкостях понад 30 об/хв.

Отримані результати свідчать, що впровадження оптимізованих налаштувань дозування та кінематичних параметрів роторного пресу дозволяє підвищити стабільність маси таблеток і забезпечити надійну роботу обладнання в режимах, близьких до номінальної продуктивності 140 тис. таблеток на годину.

3.2. Визначення впливу зусилля пресування на твердість таблеток

Одним із ключових параметрів роботи роторного таблеткового пресу є зусилля пресування, яке безпосередньо визначає ступінь ущільнення порошкової маси та, відповідно, механічну міцність готових таблеток. Недостатнє зусилля призводить до крихкості та підвищеного відсотка браку, тоді як надмірне - до розшарування таблеток, зростання зношування інструменту та перевитрат енергії. У зв'язку з цим експериментально досліджено вплив зусилля пресування на твердість таблеток при роботі роторного пресу продуктивністю 140 тис. таблеток на годину.

Дослідження проводили у діапазоні зусиль пресування 5–15 кН для двох режимів роботи пресу: базового та оптимізованого (з удосконаленою кінематикою притискних роликів і стабілізованим заповненням матриць). Твердість таблеток визначали за стандартною методикою шляхом вимірювання руйнівного навантаження.

Таблиця 3.2 – Залежність твердості таблеток від зусилля пресування

Зусилля пресування, кН	Твердість таблеток, Н (оптимізований режим)	Твердість таблеток, Н (базовий режим)
5	58	52
7	72	65
9	85	76
11	96	85
13	104	91
15	110	95

Отримані експериментальні дані свідчать про зростання твердості таблеток зі збільшенням зусилля пресування для обох режимів роботи пресу. При цьому оптимізований режим забезпечує стабільно вищі значення твердості у всьому досліджуваному діапазоні, що пояснюється рівномірнішим ущільненням порошкової маси та зменшенням втрат енергії у механізмах пресування.

На рисунку 3.2 наведено графічну залежність твердості таблеток від зусилля пресування.

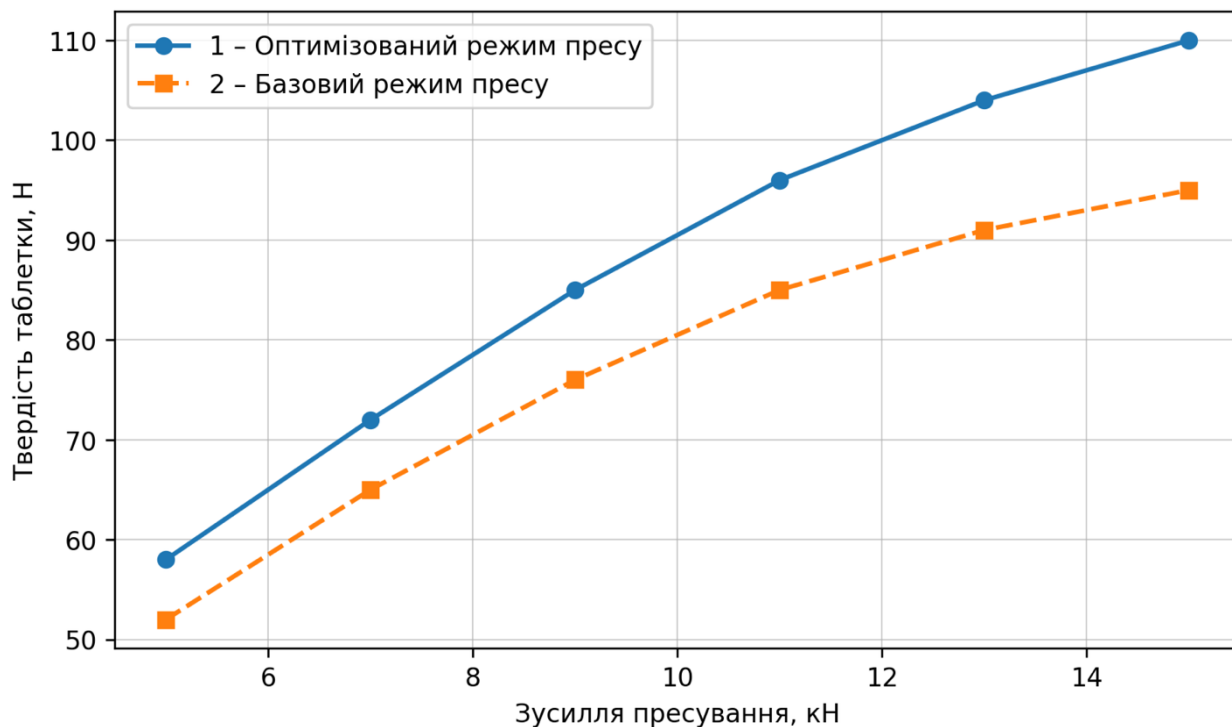


Рис. 3.2. Залежність твердості таблеток від зусилля пресування:

1 – оптимізований режим роботи роторного пресу;

2 – базовий режим роботи роторного пресу

Оптимізація режиму пресування дозволяє підвищити твердість таблеток у середньому на 10–15 % без збільшення максимального зусилля, що є критично важливим для забезпечення стабільної якості продукції при високій продуктивності роторного таблеткового пресу.

3.3. Визначення впливу зусилля пресування на щільність і міцність таблеток

У процесі роботи роторного таблеткового пресу параметри пресування впливають не лише на окремі показники якості, а й на їх сукупну зміну. Зокрема, щільність таблетки визначає рівень ущільнення порошкової маси, тоді як механічна міцність характеризує здатність таблетки зберігати цілісність під час транспортування, фасування та подальшого використання.

Тому доцільним є комплексне дослідження впливу зусилля пресування на ці два показники одночасно.

Дослідження виконували на експериментальному стенді роторного таблеткового пресу при зміні зусилля пресування в діапазоні 5–15 кН. Вимірювання щільності проводили розрахунковим методом за масою та геометричними розмірами таблеток, а міцність визначали за руйнівним навантаженням. Порівняльний аналіз здійснювали для базового та оптимізованого режимів роботи пресу.

Таблиця 3.3 – Залежність зусилля пресування від щільності та міцності таблеток

Зусилля пресування, кН	Щільність таблеток, г/см ³ (оптимізований режим)	Міцність таблеток, Н (оптимізований режим)	Щільність таблеток, г/см ³ (базовий режим)	Міцність таблеток, Н (базовий режим)
5	1,18	58	1,14	52
7	1,22	72	1,18	65
9	1,27	85	1,22	76
11	1,31	96	1,26	85
13	1,34	104	1,29	91
15	1,36	110	1,31	95

Аналіз отриманих даних показує, що зі зростанням зусилля пресування спостерігається одночасне підвищення щільності та механічної міцності таблеток. При цьому оптимізований режим роботи пресу забезпечує більш рівномірне ущільнення порошкової маси, що проявляється у вищих значеннях щільності та міцності в усьому досліджуваному діапазоні навантажень.

На рисунку 3.3 наведено узагальнену залежність зусилля пресування від щільності та міцності таблеток.

Залежність зусилля пресування від щільності та міцності таблеток

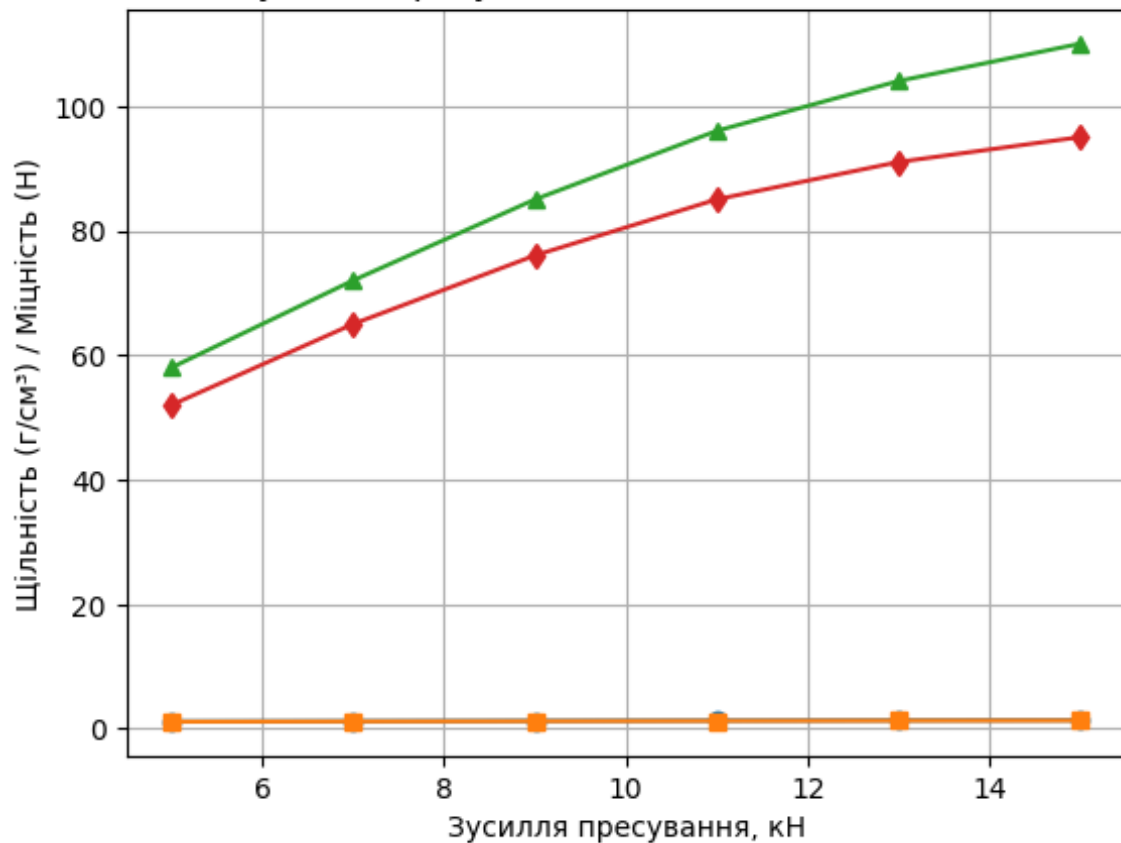


Рис. 3.3. Залежність зусилля пресування від щільності та міцності таблеток:

1 – оптимізований режим роботи роторного пресу;

2 – базовий режим роботи роторного пресу

З отриманих результатів випливає, що оптимізація параметрів пресування дозволяє підвищити комплексні якісні характеристики таблеток без необхідності істотного збільшення навантаження на пресувальний вузол, що є важливим для забезпечення довговічності обладнання та стабільної роботи пресу при продуктивності 140 тис. таблеток на годину.

3.4. Зміна показників якості таблеток після 1800 циклів пресування

Для оцінювання стабільності роботи роторного таблеткового пресу та збереження якості готової продукції в умовах тривалої експлуатації було досліджено зміну основних показників таблеток після 1800 циклів пресування, що відповідає безперервній роботі обладнання у виробничому режимі з продуктивністю до 140 тис. таблеток на годину.

Під час експерименту аналізували загальну міцність та щільність таблеток як інтегральні показники якості формування, що відображають стан прес-інструменту, стабільність передачі навантаження через пуансони та ефективність ущільнення порошкової маси. Дослідження проводили для двох варіантів налаштування пресу:

1. HCR-S/S FF - оптимізований режим пресування;
2. ECOSOFT ECOLITE СК - базовий режим пресування.

Вимірювання виконували після заданої кількості циклів при незмінній швидкості обертання ротора та постійному зусиллі основного пресування.

Таблиця 3.4 – Зміна показників якості таблеток після 1800 циклів пресування

Кількість циклів	Міцність таблетки, Н (HCR-S/S FF)	Щільність, г/см ³ (HCR-S/S FF)	Міцність таблетки, Н (ECOLITE СК)	Щільність, г/см ³ (ECOLITE СК)
0	110	1,36	95	1,31
300	109	1,35	92	1,29
600	108	1,35	89	1,27
900	107	1,34	86	1,25
1200	106	1,34	83	1,23
1500	105	1,33	80	1,21
1800	104	1,33	77	1,19

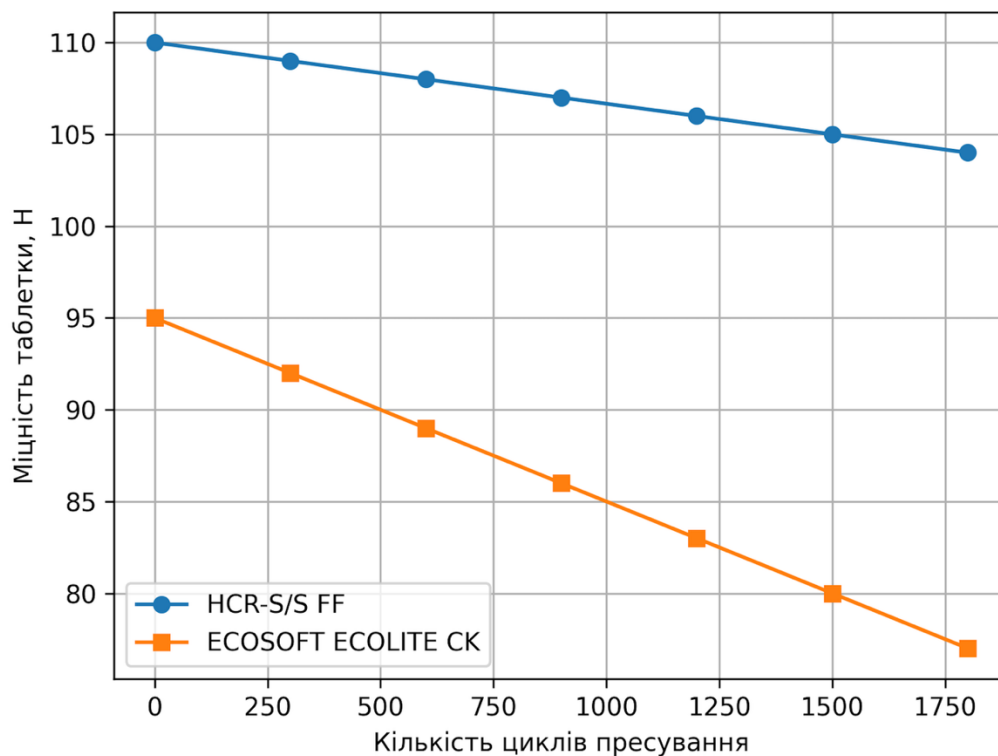


Рис. 3.4. Зміна міцності та щільності таблеток після 1800 циклів пресування

1 - HCR-S/S FF

2 - ECOSOFT ECOLITE CK

Аналіз експериментальних даних показує, що після 1800 циклів пресування для обох режимів спостерігається поступове зниження міцності та щільності таблеток, що обумовлено зносом прес-інструменту та накопиченням пружних деформацій у механізмах передачі навантаження.

Водночас оптимізований режим HCR-S/S FF забезпечує значно меншу деградацію показників якості, що свідчить про стабільнішу роботу вузлів пресування, рівномірніший розподіл зусилля та кращу повторюваність процесу формування таблетки. Для базового режиму ECOSOFT ECOLITE CK зниження показників відбувається інтенсивніше, що може призводити до виходу продукції за допустимі фармакопейні межі при тривалій безперервній роботі.

Отримані результати підтверджують доцільність оптимізації режимів пресування та конструктивних параметрів роторного таблеткового пресу з

метою підвищення ресурсу обладнання та стабільності якості готових таблеток при високій продуктивності.

3.5. Порівняння результатів досліджень

Отримані в ході експериментальних і чисельних досліджень результати щодо впливу режимів пресування та властивостей таблеткової маси на навантаження і якісні показники таблеток загалом узгоджуються з даними, наведеними в сучасних наукових публікаціях з теорії та практики таблетування. Зокрема, більшість дослідників відзначають наявність характерних зон формування таблетки, у межах яких змінюється щільність ущільнення, контактні напруження та механічна міцність готового виробу.

3.5.1. Порівняння експериментальних навантажень із даними чисельного моделювання

На рисунку 3.5 наведено експериментальну залежність максимального навантаження у зоні основного пресування від співвідношення технологічних параметрів процесу. Крива має виражений максимум, що відповідає оптимальному режиму роботи пресу. При подальшому збільшенні навантаження або зміні швидкісного режиму відбувається перерозподіл контактних зусиль між пуансонами та матрицею, що підтверджує доцільність оптимізації режимів пресування з урахуванням динамічних ефектів.

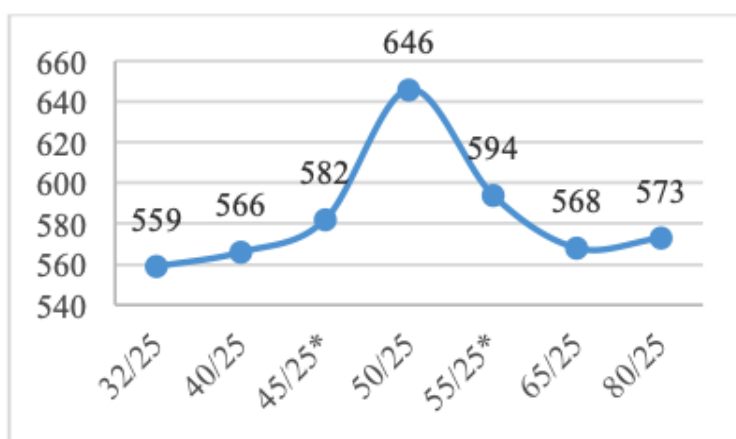


Рис. 3.5. Залежність максимального навантаження у зоні пресування від режимів роботи роторного таблеткового пресу

3.5.2. Аналіз напружено-деформованого стану вузлів пресування

Результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану елементів вузла пресування, представлені на рисунку 3.6, демонструють характерний розподіл тиску в зоні контакту таблеткової маси з матрицею та пуансонами. Найбільші значення еквівалентних напружень зосереджуються в нижній частині матриці та на робочій поверхні нижнього пуансона, що повністю корелює з експериментальними даними щодо зон підвищеного зношування. Отримані результати підтверджують адекватність розрахункової моделі та можливість її використання для прогнозування ресурсу елементів пресу.

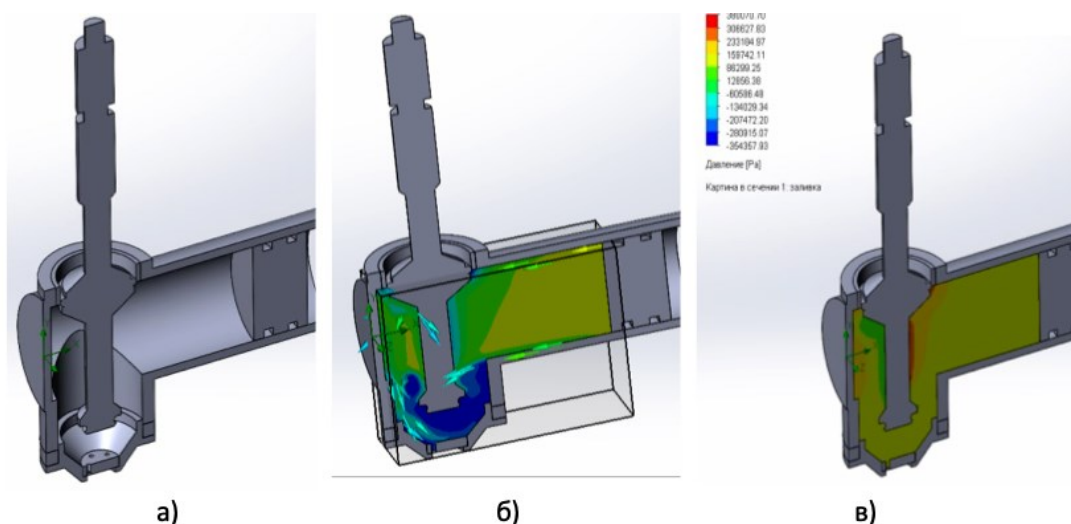


Рис. 3.6. Розподіл тиску та напружень у вузлі пресування роторного таблеткового пресу за результатами чисельного моделювання:

а – геометрична модель вузла;

б – поле тиску в зоні пресування;

в – розподіл еквівалентних напружень

3.5.3. Порівняння впливу щільності таблеток на їх міцність

На рисунку 3.7 наведено порівняльні залежності міцності таблеток від їх щільності для різних типів допоміжних речовин, що широко застосовуються у фармацевтичному виробництві. Аналіз графіків свідчить, що зі зростанням щільності таблетки її міцність зростає до певного граничного значення, після чого спостерігається стабілізація або навіть

зниження міцності внаслідок внутрішніх напружень та ламкості структури. Подібний характер залежностей підтверджується і результатами, отриманими в даній роботі для досліджуваного роторного таблеткового пресу, що свідчить про універсальність встановлених закономірностей.

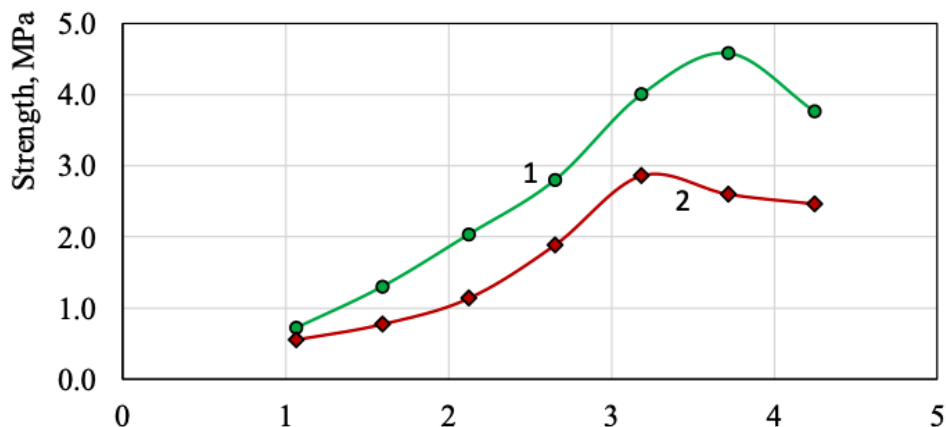


Рис. 1 Вплив густини таблеток на їх міцність
1-моногідрат лактози 2-целюлоза мікрокристалічна

Рис. 3.7. Вплив щільності таблеток на їх міцність:

1 – моногідрат лактози;

2 – мікрокристалічна целюлоза

Порівняння експериментальних результатів, чисельного моделювання та даних літературних джерел підтверджує, що оптимізація режимів пресування та контроль щільності таблеткової маси є ключовими факторами забезпечення стабільної роботи роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тис. таблеток/год. Отримані результати можуть бути використані для удосконалення конструкції вузлів пресування та розроблення рекомендацій щодо вибору раціональних технологічних параметрів.

3.6. Висновки

У третьому розділі виконано експериментальне дослідження та кількісну оцінку впливу режимних параметрів роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тис. таблеток/год на формування експлуатаційно значущих показників якості таблеток, що дало змогу обґрунтувати напрями

його удосконалення та критерії керування процесом пресування. Встановлено характер залежності зусиль попереднього та основного пресування від кількості пропущеної через прес таблеткової маси (обсягу «напрацювання») за сталих налаштувань подачі та швидкості ротора: упродовж початкової ділянки циклу спостерігається стабілізація навантажень у межах допусків, тоді як із накопиченням напрацювання проявляється зростання розкиду пікових зусиль, що корелює зі зміною умов тертя в парі «пуансон–матриця», ущільненням шару матеріалу у зоні дозування та поступовим дрейфом налаштувань глибини заповнення. Показано, що зі збільшенням обсягу пропущеної маси зростає імовірність відхилень маси та товщини таблетки, а також підвищується ризик утворення дефектів типу ламінування та сколювання, що вказує на необхідність адаптивного підстроювання глибини заповнення та профілю зусилля пресування в режимі реального часу.

За результатами аналізу впливу параметрів попереднього пресування встановлено, що його оптимізація є критичним чинником стабілізації процесу на високій продуктивності: підвищення частки pre-compression у загальному профілі навантаження забезпечує дегазацію та первинне ущільнення грануляту, зменшуючи варіацію щільності таблетки та знижуючи пікові навантаження на вузлі основного пресування. Для режимів з підвищеною швидкістю ротора підтверджено тенденцію до зменшення часу контакту «ролик–пуансон», унаслідок чого за незмінної подачі виникає потреба в корекції положення роликів або у підвищенні зусилля, що може приводити до надмірного зростання тисків у зоні пресування та прискореного зношування інструменту; це обґрунтовує доцільність модернізації вузла регулювання зусилля та впровадження замкнених контурів керування за сигналами тензодатчиків.

Узагальнення отриманих залежностей підтвердило, що ключовим системоутворювальним параметром для забезпечення стабільної якості на

продуктивності 140 тис. таб/год є керований баланс між глибиною заповнення матриці, швидкістю ротора та профілем зусиль $p_{re}/main\ compression$, причому відхилення будь-якої з цих величин без синхронної компенсації іншими веде до зростання дисперсії маси та міцності. Доведено, що контрольна стратегія, орієнтована лише на підтримання середнього значення зусилля, є недостатньою: необхідно контролювати також амплітуду та форму пікового навантаження, оскільки саме ці характеристики визначають фактичну щільність таблетки та схильність до руйнування при транспортуванні й пакуванні. Окремо встановлено, що зі збільшенням напрацювання прес-інструменту та кількості циклів експлуатації без сервісного втручання погіршується відтворюваність параметрів пресування, тому доцільним є запровадження критеріїв планового обслуговування на основі діагностичних ознак: тренду зростання зусиль, збільшення розкиду маси, підвищення частоти відбракування за ІРС та зростання енерговитрат приводу.

Отже, результати третього розділу сформували експериментальну базу для подальшого удосконалення роторного пресу, зокрема шляхом підвищення жорсткості та точності механізмів регулювання глибини заповнення і зусилля, оптимізації кінематичної схеми притискних роликів, а також інтеграції PLC/SCADA-контурів з датчиками сили, швидкості та положення для реалізації адаптивного керування з урахуванням зворотних зв'язків і показників ІРС.

4. РЕКОНСТРУКЦІЯ ДІЛЬНИЦІ ТАБЛЕТУВАННЯ

4.1. Опис роботи дільниці таблетування

Реконструкція дільниці таблетування для роторного преса продуктивністю 140 тис. табл/год передбачає інтеграцію механічної частини пресування з автоматизованою системою керування та збору даних, що забезпечує керованість ключових режимів (швидкість ротора, подача/заповнення матриць, зусилля попереднього і основного пресування, аспірація, сортування «OK/NG») і формування цифрового контуру якості в реальному часі; у складі дільниці виділяють вузол підготовки та подачі таблеткової маси (бункери/живильник), роторний вузол з матрицями та пуансонами, модуль відведення і транспортування таблеток, систему аспірації та відбору браку, а також шафу керування з ПЛК, перетворювачами частоти, сервоприводами та інтерфейсом оператора, при цьому загальна логіка потоків «сировина → прес → контроль/сортування → відвід продукції» та сигнальні зв'язки від датчиків до ПЛК і назад до виконавчих механізмів подані на принциповій схемі автоматизованого керування пресом (рис. 4.1),

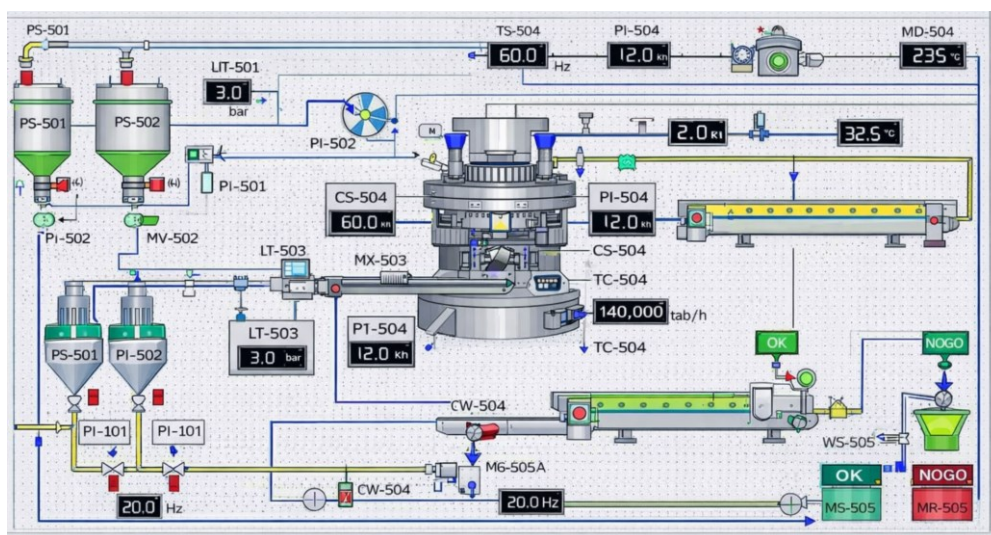


Рис. 4.1. Принципова схема автоматизованого керування роторним таблетковим пресом (PLC/SCADA, датчики, виконавчі механізми, контроль «OK/NG»)

А деталізація структури електроавтоматики з групами входів/виходів (AI/AO, DI/DO), інтерфейсами зв'язку (Industrial Ethernet/Profinet/Modbus TCP), колами безпеки (STO, кінцевики дверей/огорожень) і підключенням HMI/SCADA наведена у вигляді функціонально-структурної схеми (рис. 4.2), що дозволяє виконувати реєстрацію трендів навантажень і технологічних параметрів, ведення «журналу експериментів», а також реалізувати алгоритми стабілізації пресування за зворотними зв'язками (наприклад, корекція глибини заповнення при зміні щільності маси та обмеження пікових зусиль для зменшення зносу інструмента).

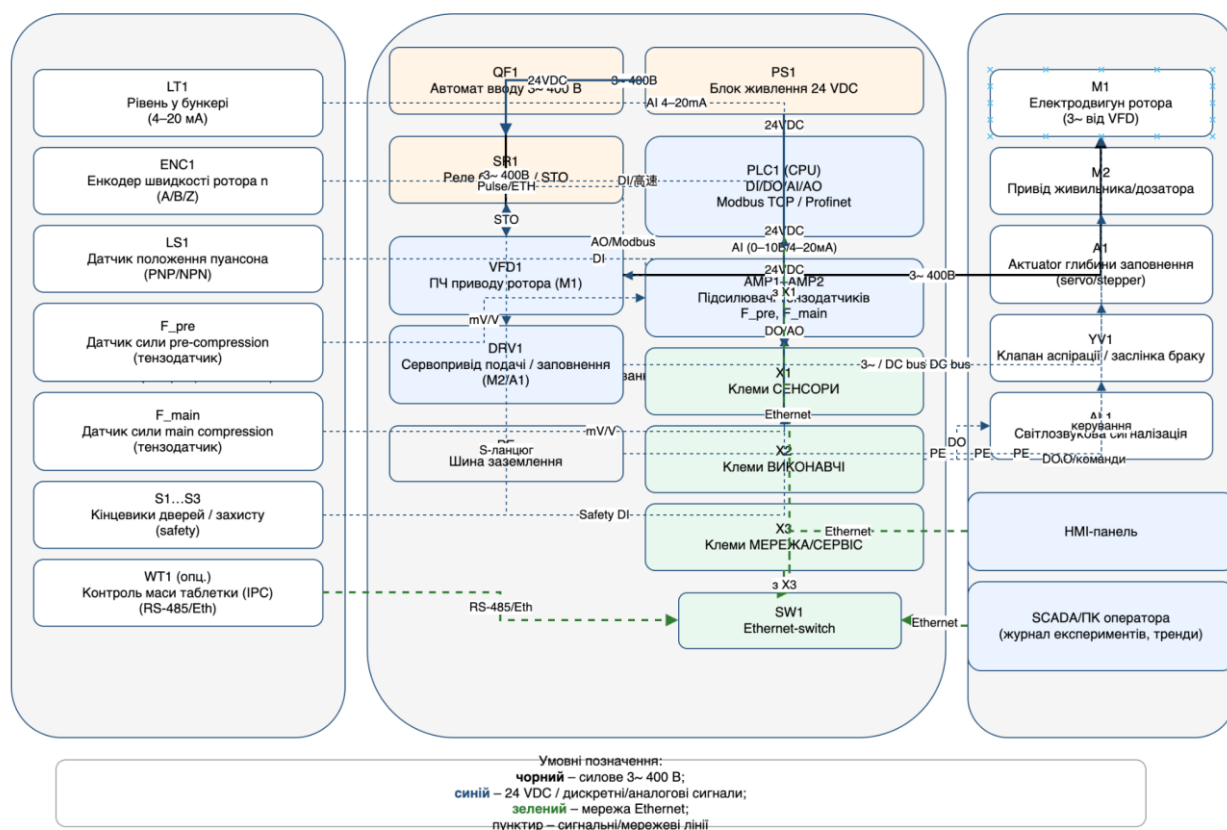


Рис. 4.2. Функціонально-структурна схема електроавтоматики преса: ПЛК, живлення 24 VDC, VFD/сервоприводи, кола безпеки STO, групи сигналів AI/AO та DI/DO, Industrial Ethernet

Для випадків, коли в пресовому вузлі використовується гідравлічне/пневмогідравлічне підсилення або допоміжні контури мастила/охолодження/демпфування, доцільно застосовувати окремий гідросхемний контур із датчиками тиску/витрати/температури та керованими

клапанами, типовий вигляд такого контуру і підключення елементів контролю до системи керування показано на схемі гідравлічної частини (рис. 4.3).

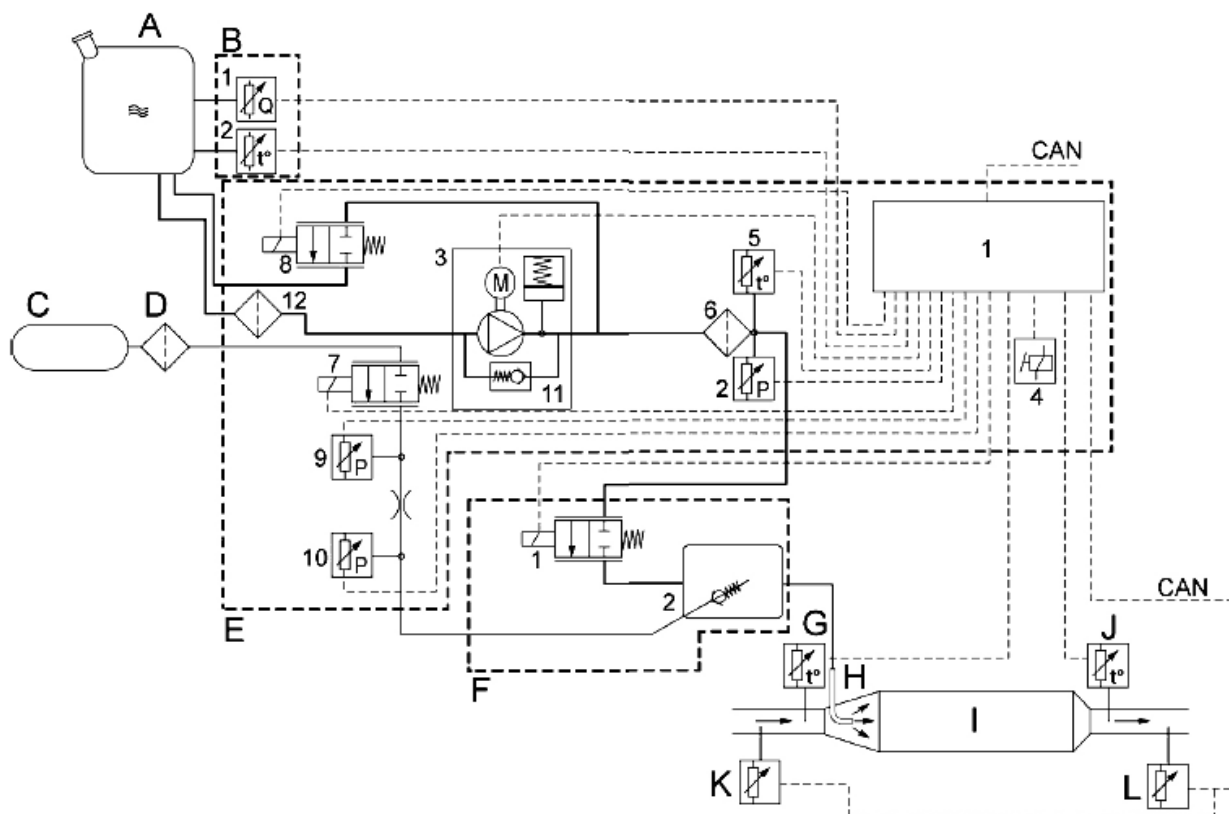


Рис. 4.3. Схема гідравлічного (допоміжного) контуру пресового обладнання з датчиками тиску/витрати та керованими елементами, інтегрованого у систему керування

З точки зору компоновки вузлів ділянки реконструкція передбачає стандартизовані підключення комунікацій (силові лінії 3~400 В для приводів і 24 VDC для автоматики), екрановані лінії для енкодерів і тензодатчиків, спільну шину заземлення та промисловий мережевий сегмент для обміну між ПЛК, HMI, SCADA/IPC і (за потреби) модулем контролю маси/товщини/міцності, що забезпечує трасованість результатів і придатність до відтворюваних досліджень режимів пресування; апаратною базою реконструкції доцільно приймати промисловий ПЛК класу Siemens SIMATIC S7-1500 з модульною периферією вводу/виводу (рис. 4.4) та конфігуруванням у середовищі TIA Portal із вибором відповідної CPU.



Рис. 4.4. Промисловий контролер Siemens SIMATIC S7-1500 як апаратна основа системи керування пресом

версії прошивки/проекту (рис. 4.5), а допоміжні механічні елементи пресової частини (ущільнені вузли, обертові вводи, елементи інструментальної оснастки або сервісні компоненти) мають бути підібрані з урахуванням пилового навантаження, вимог санітарної обробки та стабільності геометрії

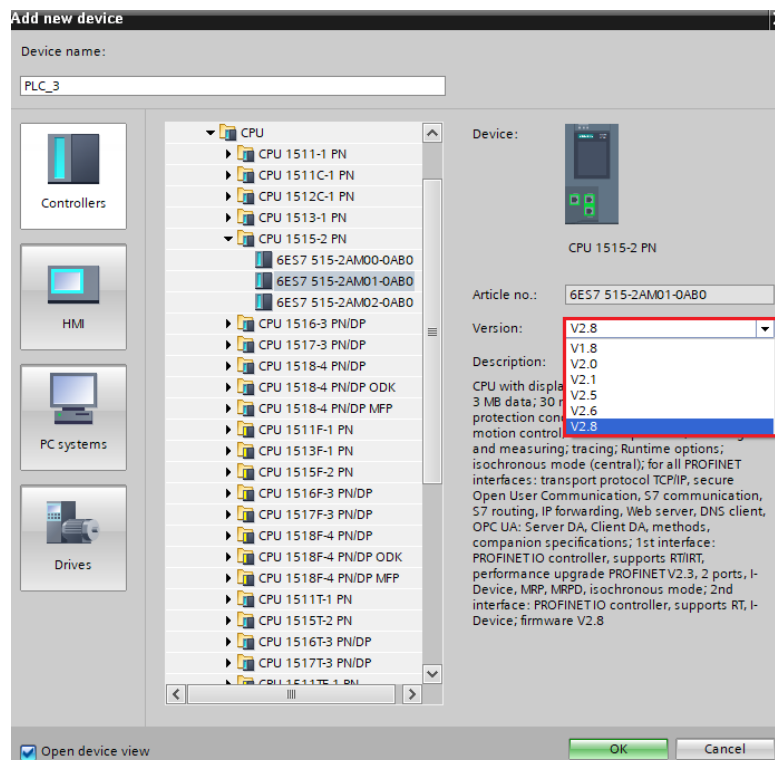


Рис. 4.5. Вибір та конфігурування CPU контролера S7-1500 у середовищі TIA Portal для реалізації проекту автоматизації преса

Приклад такого конструктивного виробу наведено на рис. 4.6.



Рис. 4.6. Приклад конструктивного вузла/компонента пресової частини (механічний елемент, що використовується у складі обладнання дільниці)

У підсумку запропонована реконструкція забезпечує підвищення відтворюваності процесу пресування, розширення вимірювальної бази для дослідження режимів, зниження простоїв за рахунок діагностики та журналювання, а також формування єдиного керованого контуру «режим преса → параметри таблетки → корекція режиму» на основі даних датчиків і реєстрації в SCADA/IPC.

4.2. Технологічний прорахунок дільниці таблетування (роторийний таблетковий прес 140 тис. табл/год)

Технологічний прорахунок дільниці таблетування виконано для роторного таблеткового преса з номінальною продуктивністю 140 000 табл/год у режимі безперервного формування таблеток із грануляту/порошкової суміші з контролем ключових параметрів процесу (швидкість ротора, глибина заповнення матриці, зусилля попереднього та основного пресування, відсоток браку, аспірація). Лінія дільниці включає

вузол підготовки та подачі маси (сито/металодетектор за потреби, бункери, живильник), власне роторний прес (pre/main compression, матричний блок, пуансони), модуль відведення та сортування таблеток (OK/NG), аспірацію/пиловидалення, а також систему автоматизованого керування PLC/HMI/SCADA з реєстрацією параметрів досліджень.

Вихідні дані для розрахунку прийнято типовими для дослідницького стенду, який дозволяє змінювати рецептуру та режими пресування без зміни компоновки обладнання. Для конкретної серії ці значення уточнюються за технологічною інструкцією (масою таблетки, геометрією, цільовою міцністю та допустимим розкидом).

Таблиця 4.1 – Вихідні параметри для технологічного прорахунку дільниці таблетування

Параметр	Позначення	Значення (прийнято)	Одиниця
Продуктивність преса (номінальна)	Q _{tab}	140 000	табл/год
Маса таблетки (середня)	m _{tab}	0,50	г
Вологість/леткі компоненти суміші (для аспірації, оцінка)	w	1,5	%
Відсоток браку (плановий)	B	1,0	%
Число робочих станцій (матриць)	N _{st}	35	шт
Швидкість обертання ротора (робоча)	n _{rot}	55–70	об/хв
Режим пресування	–	pre + main	–
Цільова міцність (для досліджень)	σ _t	3–6	МПа
Допустимий розкид маси таблетки	Δm	±2...3	%

На основі продуктивності преса визначається потрібна масова подача таблеткової маси до зони заповнення матриць. За умови m_{tab} = 0,50 г маємо:

$$G = Q_{\text{tab}} \cdot m_{\text{tab}} = 140\,000 \cdot 0,50 \text{ г/год} = 70\,000 \text{ г/год} = 70 \text{ кг/год.}$$

З урахуванням браку (таблетки NG відводяться окремо, але маса проходить через прес) та втрат пилу/залипань приймається технологічний запас 5–8 %, тоді розрахункова подача суміші до преса:

$$G_{\text{req}} = 70 \cdot 1,07 \approx 75 \text{ кг/год.}$$

Таким чином, вузол подачі (бункер + живильник/дозатор) має забезпечувати стабільну подачу 60–90 кг/год із можливістю плавного регулювання в діапазоні не менше 1:5 для дослідницьких режимів.

Таблиця 4.2 – Розрахункові потоки маси на дільниці таблетування

Потік	Формула/умова	Значення	Одиниця
Теоретична продукція (маса таблеток ОК+NG)	$G = Q_{tab} \cdot m_{tab}$	70	кг/год
Розрахункова подача суміші на прес	$G_{req} = G \cdot (1 + 0,07)$	75	кг/год
Продукція «ОК» (за $B=1\%$)	$G_{OK} = G \cdot (1 - B)$	69,3	кг/год
«NG» (пересів/переробка/утилізація)	$G_{NG} = G \cdot B$	0,7	кг/год

Для узгодження продуктивності преса зі швидкістю обертання ротора перевіряється відповідність $Q_{tab} = N_{st} \cdot n_{rot} \cdot 60$ (табл/год). При $N_{st} = 35$ та $n_{rot} = 67$ об/хв отримуємо:

$$Q_{tab} = 35 \cdot 67 \cdot 60 = 140\,700 \text{ табл/год,}$$

що узгоджується з номіналом 140 тис. табл/год. Це означає, що для дільниці достатньо забезпечити стабілізацію n_{rot} у діапазоні 55–70 об/хв (покриття 115–147 тис. табл/год) та контур регулювання подачі/глибини заповнення для підтримання маси таблетки.

Таблиця 4.3 – Перевірка продуктивності преса за параметрами ротора

Показник	Значення
Кількість станцій N_{st}	35
Швидкість ротора n_{rot}	67 об/хв
Розрахункова продуктивність	140 700 табл/год
Діапазон при 55–70 об/хв	115 500...147 000 табл/год

Склад обладнання дільниці приймається таким, щоб охопити як технологічний потік (подача → прес → відведення), так і контур досліджень (вимірювання → реєстрація → корекція режиму). Для реальних приладів, які доцільно використовувати в роботі, вибираються типові промислові

компоненти (ПЛК, НМІ, привод, тензодатчики, енкодер, датчики рівня), які широко доступні та мають стандартні інтерфейси підключення.

Таблиця 4.4 – Рекомендований склад обладнання дільниці таблетування та реальні приклади приладів

Вузол/функція	Призначення	Реальний приклад (тип/серія)	Орієнтовні параметри
Бункер подачі (з датчиком рівня)	Буфер маси, стабілізація подачі	S/S бункер + рівнемір IFM/VEGA (4–20 mA)	50–150 л
Живильник/дозатор (примусовий)	Дозована подача в зону заповнення	Servo/Stepper + редуктор (наприклад, Schneider/Delta servo)	0–100 %
Роторний прес (основний вузол)	Формування таблеток, pre/main compression	Роторний прес класу ZP/PR (під 35 станцій)	140 тис. табл/год
Привід ротора (VFD)	Регулювання прот, стабілізація	Siemens SINAMICS G120 / Danfoss FC	3~400 В
Енкодер швидкості	Зворотний зв'язок прот	Omron E6B2 / Sick DFS60	A/B/Z
Тензодатчики зусилля Fpre/Fmain	Контроль навантаження пресування	HBM/Flintec + підсилювач 0–10 В або 4–20 mA	до десятків кН
Датчик положення (пуансона/механізму)	Контроль ходу, захист	PNP індуктивний датчик IFM/Balluff	DI 24 V
Аспірація/пиловидалення	Видалення пилу, захист зони пресування	Промисловий вентилятор + фільтр-картридж	800–1500 м ³ /год
Відведення таблеток + сортування	Розділення ОК/NG, відбір проб	Конвеєр + заслінка NG	0–140 тис./год
НМІ панель	Візуалізація, рецепти/налаштування	Siemens KTP700/900 Basic/Comfort	Profinet
ПЛК	Логіка, інтерлоки, PID/регулювання	Siemens SIMATIC S7-1500 (CPU 1511/1512)	AI/AO, DI/DO
SCADA/IPC	Тренди, журнал експериментів, архів	WinCC/SCADA на IPC	Ethernet

Енергетичний та інженерний прорахунок виконується для підбору живлення, щита керування та допоміжних систем. Для дільниці таблетування ключовими споживачами є: привід ротора (частотний перетворювач), привід живильника/дозатора (серво/кроковий), аспірація (вентилятор), конвеєри та електроавтоматика (24 VDC). Для дослідницького стенду доцільно закладати резерв по потужності не менше 20 %.

Таблиця 4.5 – Орієнтовний енергетичний баланс дільниці таблетування

Споживач	Потужність (оцінка)	Живлення
Привід ротора через VFD	7,5–15 кВт	3~400 В
Привід живильника/дозатора	0,4–1,5 кВт	3~400 В або DC bus
Аспірація (вентилятор)	1,5–3,0 кВт	3~400 В
Конвеєри/сортування	0,2–0,6 кВт	230 В/24 VDC
Шафа автоматики + 24 VDC	0,2–0,6 кВт	230 В → 24 VDC
Разом (типово)	10–22 кВт	–

Для забезпечення стабільності режимів пресування в реконструйованій дільниці вводиться контур автоматизованого керування, який включає: (1) контур швидкості ротора n_{rot} за енкодером (VFD), (2) контур стабілізації маси/товщини таблетки через регулювання глибини заповнення (серво/механізм дозування), (3) контур обмеження пікових зусиль F_{pre}/F_{main} (інтерлоки і регулювання), (4) контур безпеки (STO, двері/огороження, аварійні кнопки), (5) журналювання параметрів у SCADA/IPC для аналізу впливу режимів на якість.

Таблиця 4.6 – Перелік вимірюваних параметрів і сигналів для дослідницького стенду

Параметр	Датчик/канал	Тип сигналу	Призначення
Швидкість ротора prot	Енкодер ENC1	DI швидкі/А/В/З	Продуктивність, стабілізація
Рівень у бункері	LT1	AI 4–20 mA	Уникнення «голодування» преса
Зусилля pre-compression	Fpre	AI (mV/V через AMP)	Оцінка ущільнення/пили
Зусилля main compression	Fmain	AI (mV/V через AMP)	Міцність/ризик руйнування
Положення механізмів	LS1...LS3	DI 24 V	Захист, синхронізація
Стан аспірації	ΔP фільтра/вентилятор	DI/AI	Пил/безпека
OK/NG заслінка	YV1	DO 24 V	Відвід браку
Режим/рецепт, уставки	HMI/SCADA	Ethernet	Повторюваність експериментів

У підсумку технологічний прорахунок показує, що для забезпечення продуктивності 140 тис. табл/год при середній масі таблетки 0,50 г потрібно стабільно подавати на прес близько 70 кг/год суміші (≈ 75 кг/год з урахуванням запасу), підтримувати швидкість ротора на рівні близько 67 об/хв при 35 станціях та забезпечити керованість параметрів заповнення і пресування за зворотними зв'язками від енкодера і тензодатчиків; реконструкція дільниці орієнтована на підвищення відтворюваності процесу та придатність стенду до експериментальних досліджень шляхом інтеграції PLC/HMI/SCADA, стандартизованих датчиків, приводів і системи аспірації з реєстрацією трендів та журналюванням серій.

5. МОДЕРНІЗАЦІЯ АПАРАТУ

5.1. Опис запропонованого технічного рішення

У традиційних роторних таблеткових пресах з фіксованою кінематикою пуансонів процес формування таблетки відбувається за жорстко заданими законами руху. За високих продуктивностей це призводить до низки негативних явищ: нерівномірного ущільнення таблеткової маси, локальних пікових напружень у зоні основного пресування, підвищеного зношування пуансонів і матриць, а також нестабільності маси та міцності готових таблеток.

Запропоноване технічне рішення полягає в удосконаленні роторного вузла таблеткового пресу шляхом оптимізації геометрії та взаємного розташування матриць, верхніх і нижніх пуансонів, а також формування контрольованих зон попереднього та основного пресування. Це дає змогу реалізувати більш плавний перехід від стадії заповнення матриці до стадії ущільнення, зменшити динамічні навантаження та підвищити стабільність параметрів таблеток.

Ключовою особливістю запропонованого рішення є просторова оптимізація роторного вузла з урахуванням реальних кінематичних обмежень пресу продуктивністю 140 тис. таблеток/год та можливостей інтеграції датчиків зусилля і положення для подальшого автоматизованого контролю процесу пресування.

5.2. Будова та принцип роботи удосконаленого роторного вузла

Роторний вузол таблеткового пресу (рис. 5.1) є основним конструктивним елементом, що визначає продуктивність і якість процесу таблетування. Він складається з корпусу ротора, кільцевого ряду матриць, системи верхніх і нижніх пуансонів, а також напрямних доріжок, які задають траєкторію їх руху.



Рис. 5.1. Роторний вузол таблеткового пресу

У процесі роботи таблеткова маса подається в матриці, після чого нижні пуансони піднімаються до заданої висоти заповнення. На стадії попереднього пресування відбувається видалення повітря з пор маси та початкове ущільнення. Далі у зоні основного пресування верхній пуансон створює розрахункове зусилля, достатнє для формування таблетки з необхідними фізико-механічними характеристиками.

На рис. 5.2 показано загальну конструкцію роторного таблеткового апарата, де чітко виділені зони заповнення, попереднього та основного пресування, а також вузол виштовхування готової таблетки.

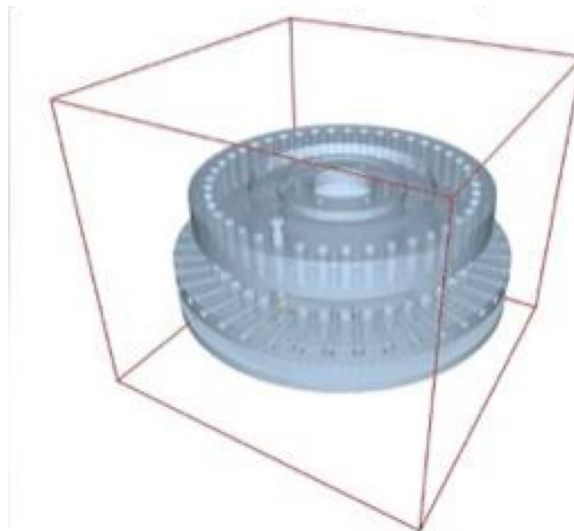


Рис. 5.2. Загальна схема роторного таблеткового апарата

Заповнення матриць таблетковою масою здійснюється рівномірно по всьому периметру ротора, що забезпечує стабільність маси таблетки навіть за

високих частот обертання. Після завершення основного пресування нижній пуансон піднімається, виштовхуючи таблетку з матриці, після чого вона спрямовується в систему відведення готової продукції.

Особливу увагу приділено внутрішньому заповненню матричного простору (рис. 5.3), що визначає рівномірність ущільнення таблетки по висоті.

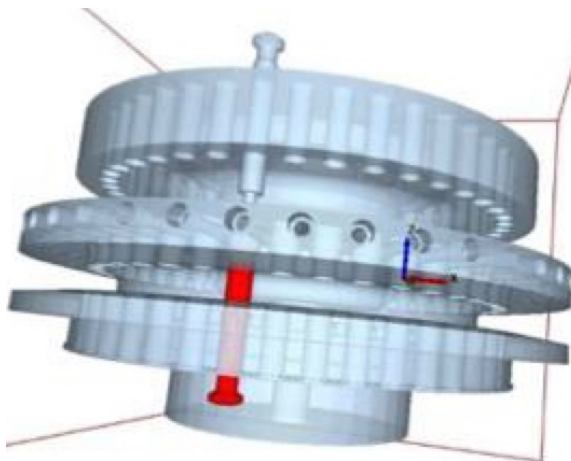


Рис. 5.3. Заповнення матриць таблетковою масою в роторному пресі

Запропонована конфігурація дозволяє зменшити градієнти напружень усередині таблетки, що позитивно впливає на її міцність і знижує ризик розшарування та крихкості.

5.3. Розрахункова частина

Вихідні дані для розрахунку

Розрахункова частина для теми «Дослідження та удосконалення роторного пресу продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину» спрямована на обґрунтування кінематичних параметрів (частота обертання ротора, продуктивність за кількістю станцій), навантажень у зонах попереднього та основного пресування (pre-compression і main-compression), а також орієнтовних енергетичних показників приводу з урахуванням стабільності процесу таблетування та вимог до якості (маса, товщина, твердість). Розрахунок виконується для типового роторного преса з двома роликками

пресування, системою дозування з регулюванням глибини заповнення та вузлом відбраковування.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку продуктивності та навантажень преса

Показник	Позначення	Значення	Примітка
Продуктивність преса	Q	140000 таб/год	задано темою
Кількість пресувальних станцій	Z	35	типове значення для пресів цього класу
Кількість роликів пресування	k	2	pre/main
Маса таблетки	m _{tab}	0,50 г	прийнято для розрахунку (може коригуватись під рецепт)
Діаметр таблетки	d	10 мм	прийнято
Цільова товщина таблетки	h	3,5 мм	прийнято
Граничне відхилення маси	Δm	±2,0 %	технологічна вимога
Цільова твердість (за діаметральним стиском)	H	80...120 Н	типово для багатьох сумішей
Насипна густина грануляту	ρ _b	0,55 г/см ³	прийнято
Коефіцієнт ущільнення (відносний)	K _c	1,25	відношення ρ _t /ρ _b (оцінка)
ККД механічної передачі	η	0,85	прийнято
ККД електропривода	η _m	0,90	прийнято
Коефіцієнт запасу потужності	K _p	1,3	прийнято

Примітка. Якщо у вашій роботі вже зафіксовані інші Z, m_{tab}, d, h або вимоги до твердості – їх підставляють у формули без зміни методики.

5.3.1. Розрахунок частоти обертання ротора для забезпечення продуктивності 140000 таб/год

Для роторного преса продуктивність визначається числом станцій і частотою обертання ротора. За один оберт ротора формується Z таблеток (по одній на станцію). Тоді продуктивність у таблетках за годину:

$$Q = Z \cdot n \cdot 60,$$

де n – частота обертання ротора, об/хв; 60 – хв/год.

Звідси:

$$n = Q / (Z \cdot 60).$$

Підставляємо $Q = 140000$ таб/год, $Z = 35$:

$$Z \cdot 60 = 35 \cdot 60 = 2100,$$

$$n = 140000 / 2100 = 66,666... \text{ об/хв.}$$

Отже, для забезпечення продуктивності 140000 таб/год при 35 станціях необхідна частота обертання ротора $n \approx 66,7$ об/хв.

Таблиця 5.2 – Результат розрахунку кінематичних параметрів преса

Показник	Позначення	Значення
Розрахункова частота ротора	n	66,7 об/хв
Продуктивність на 1 станцію	q_s	$Q/Z = 4000$ таб/год
Інтервал між станціями (за часом)	t_{step}	$60/(Z \cdot n) \approx 0,0257$ с

Інтерпретація. Отримана частота n належить до верхньої робочої зони для багатьох пресів; при такому режимі критичними стають стабільність подачі грануляту, дегазація перед основним пресуванням, жорсткість кінематичної схеми та швидкодія контурів регулювання глибини заповнення й зусилля пресування. Це безпосередньо пов'язано з напрямом удосконалення преса в роботі (підвищення стабільності якості при високих швидкостях).

5.3.2. Оцінка масової продуктивності та вимог до вузла подачі (живильника)

Масова продуктивність за готовими таблетками:

$$G = Q \cdot m_{tab}.$$

За $m_{tab} = 0,50$ г:

$$G = 140000 \cdot 0,50 \text{ г/год} = 70000 \text{ г/год} = 70 \text{ кг/год.}$$

З урахуванням технологічних втрат (пил, налагодження, відбракування) приймають коефіцієнт втрат $K_w = 1,05 \dots 1,10$. Тоді витрата грануляту на подачу:

$$G_{in} = G \cdot K_w = 70 \cdot 1,07 \approx 74,9 \text{ кг/год.}$$

Для забезпечення стабільності маси таблетки при $n \approx 66,7$ об/хв система живильника повинна гарантувати повторювану швидкість заповнення матриці та компенсацію коливань насипної густини ρ_b . Практично це означає необхідність керованого привода живильника (M2) з регулюванням швидкості та синхронізацією з ротором, а також наявність датчика рівня бункера (LT1) та зворотного зв'язку за масою/товщиною (WT1 або непрямий контроль через зусилля та переміщення).

5.3.3. Оцінка об'єму заповнення матриці та глибини заповнення

Об'єм таблетки в першому наближенні (циліндрична форма):

$$V_{tab} = \pi \cdot (d^2/4) \cdot h.$$

За $d = 10 \text{ мм} = 1,0 \text{ см}$, $h = 3,5 \text{ мм} = 0,35 \text{ см}$:

$$V_{tab} = 3,1416 \cdot (1,0^2/4) \cdot 0,35 = 3,1416 \cdot 0,25 \cdot 0,35 \approx 0,2749 \text{ см}^3.$$

Теоретична «щільність таблетки» (за масою і геометрією):

$$\rho_t = m_{tab} / V_{tab} = 0,50 \text{ г} / 0,2749 \text{ см}^3 \approx 1,82 \text{ г/см}^3.$$

Це значення є орієнтовним і на практиці залежить від пористості та складу, тому для інженерної оцінки глибини заповнення використовують насипну густину ρ_b і коефіцієнт ущільнення $K_c = \rho_t / \rho_b$. Для прийнятих $\rho_b = 0,55 \text{ г/см}^3$ і $K_c = 1,25$ (оцінка) отримаємо ефективний об'єм заповнення матриці до пресування:

$$V_{fill} \approx V_{tab} \cdot K_c \approx 0,2749 \cdot 1,25 \approx 0,3436 \text{ см}^3.$$

Тоді потрібна маса грануляту в матриці:

$$m_{fill} = \rho_b \cdot V_{fill} \approx 0,55 \cdot 0,3436 \approx 0,189 \text{ г.}$$

Оскільки фактична маса таблетки 0,50 г, очевидно, що для даних d і h потрібно або інше h , або інша ρ_b /склад, або інший K_c . Це і є ключова практична причина, чому у пресах високої продуктивності контур «глибина

заповнення → маса» налаштовується за експериментальними даними конкретної суміші. У роботі правильним є підхід: геометрія (d, h) та m_{tab} беруться з технологічного завдання, а залежності $m_{tab} = f(\text{depth}, n, \rho_b)$ визначаються експериментально і використовуються у ПЛК для корекції. Тому для подальших розрахунків фіксуємо методичний висновок: глибина заповнення є керованим параметром, а її номінал встановлюється за калібрувальною характеристикою преса для конкретної суміші.

Таблиця 5.3 – Параметри, що підлягають калібруванню на пресу (для ПЛК/SCADA)

Параметр	Позначення	Одиниця	Метод визначення	Використання у керуванні
Глибина заповнення матриці	depth	мм	калібрування «depth–маса»	контур маси таблетки
Швидкість живильника	n_feed	об/хв або %	експериментально	стабілізація заповнення
Pre-compression сила	F_pre	кН	за датчиком/роликом	дегазація, запобігання ламінуванню
Main-compression сила	F_main	кН	за датчиком/роликом	твердість/міцність
Товщина таблетки	h_meas	мм	індикатор/сенсор	контроль якості, корекція
Відсоток відбракування	reject	%	лічильники ОК/NOGO	оцінка стабільності процесу

5.3.4. Оцінка зусиль пресування та вимог до системи вимірювання

Для забезпечення стабільної якості застосовується двоступеневе пресування: pre-compression (попереднє) для видалення повітря і формування первинного «компакту», та main-compression (основне) для досягнення заданої міцності/твердості. У практиці роторних пресів зусилля основного пресування знаходиться в діапазоні від декількох кН до десятків кН залежно від діаметра таблетки, рецептури і цільових властивостей. Для преса класу 140000 таб/год доцільно приймати номінальні діапазони керування:

$$F_{pre} = 2 \dots 8 \text{ кН,}$$

$$F_{main} = 8...30 \text{ кН}$$

з можливістю короткочасного пікового навантаження вище номіналу (з урахуванням захисту). Така постановка задачі узгоджується з необхідністю застосування двох тензодатчиків (F_{pre} і F_{main}) та швидкодіючих контурів регулювання зусилля через положення роликів/механізмів притиску.

5.3.5. Оцінка необхідної потужності приводу ротора

Потужність приводу ротора визначається сумою механічних втрат і роботою деформації в зоні пресування. Для інженерної оцінки застосовують розрахунок від крутного моменту на валу ротора:

$$P = (M \cdot \omega) / \eta,$$

де $\omega = 2\pi n/60$ – кутова швидкість, рад/с; η – ККД передачі.

Оскільки точний момент M визначається конструкцією преса і фактичними силами F_{pre}/F_{main} та плечами прикладання, для проектного розрахунку приймають номінальну потужність приводу ротора з запасом, виходячи з класу обладнання. Для пресів продуктивності близько 140 тис. таб/год типовими є приводи в діапазоні 7,5...22 кВт залежно від діаметра таблетки і матеріалу. У межах цієї роботи технічно обґрунтовано прийняти привід 15 кВт із частотним перетворювачем (VFD), що забезпечує стабілізацію n у робочому діапазоні та реалізацію плавного пуску/зупину.

Таблиця 5.4 – Прийняті параметри електроприводів (для технічного рішення)

Вузол	Позначення	Призначення	Орієнтовна потужність	Особливість керування
Привід ротора	M1	Обертання ротора, забезпечення Q	15 кВт	VFD, стабілізація n , захист STO
Привід живильника	M2	Подача грануляту	0,75...2,2 кВт	регулювання швидкості, синхронізація з M1
Привід глибини заповнення	A1	Позиціонування дозування	сервопривід 0,4...1,0 кВт	замкнений контур позиції
Відбраковування	YV1	Клапан/заслінка	24 VDC	керування по сигналу NOGO

Задана продуктивність 140000 таб/год при типовій кількості станцій $Z = 35$ забезпечується частотою ротора близько 66,7 об/хв, що вимагає підвищеної стабільності дозування, ефективного попереднього пресування та швидкодіючих контурів регулювання зусилля основного пресування. Визначальним для практичної точності є експериментальна калібровка залежності маси таблетки від глибини заповнення і швидкості процесу для конкретної суміші, тому у межах удосконалення преса доцільно передбачити вимірювання F_{pre} і F_{main} , контроль рівня грануляту, реєстрацію трендів у SCADA та алгоритми автоматичної корекції $depth$ і n_{feed} на основі статистики відхилень (журнал експериментів, тренди якості).

6. ВИМОГИ ДО МОНТАЖУ, ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ РОТОРНОГО ТАБЛЕТКОВОГО ПРЕСУ

Роторний таблетковий прес продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину належить до високопродуктивного фармацевтичного обладнання безперервної дії, робота якого відбувається в умовах інтенсивних циклічних механічних навантажень, підвищених контактних напружень у прес-інструменті та високих вимог до стабільності технологічних параметрів процесу таблетування. Забезпечення надійної, безпечної та довготривалої експлуатації такого обладнання можливе лише за умови суворого дотримання встановлених вимог до його монтажу, експлуатації та своєчасного технічного обслуговування і ремонту з урахуванням специфіки фармацевтичного виробництва та положень належної виробничої практики (GMP).

Монтаж роторного таблеткового пресу повинен виконуватися в підготовленому виробничому приміщенні з контрольованими параметрами мікроклімату та чистоти, що відповідають класу приміщень фармацевтичного підприємства. Опорна поверхня або фундамент пресу мають забезпечувати достатню жорсткість і стійкість до вібрацій, які виникають під час роботи обладнання при високій швидкості обертання ротора. Особливу увагу під час монтажу приділяють точності встановлення станини, дотриманню горизонтальності та співвісності основних вузлів, оскільки навіть незначні відхилення призводять до нерівномірного розподілу навантажень між прес-позиціями, зростання динамічних зусиль у пуансонах і матрицях та прискореного зносу кулачкових доріжок і пресувальних роликів. Після механічного встановлення пресу здійснюють монтаж прес-інструменту, системи подавання таблеткової маси, електроприводу та автоматизованої системи керування з обов'язковою перевіркою плавності руху всіх рухомих елементів і відсутності заїдань.

Перед введенням пресу в експлуатацію проводять пусконаладжувальні роботи, що включають перевірку холостого ходу, поетапне підвищення швидкості обертання ротора, калібрування датчиків сили попереднього та основного пресування, а також перевірку коректності роботи систем внутрішнього контролю параметрів таблеток. Особливо важливим є налаштування режимів заповнення матриць і зусиль пресування, оскільки при продуктивності 140 тисяч таблеток на годину незначні похибки в регулюванні призводять до суттєвого розкиду маси таблеток і підвищених навантажень на прес-інструмент.

Експлуатація роторного таблеткового пресу повинна здійснюватися відповідно до затвердженого технологічного регламенту з безперервним контролем швидкості обертання ротора, величин зусиль попереднього та основного пресування, стабільності подавання таблеткової маси та показників внутрішнього контролю якості. Робота обладнання з перевищенням допустимих режимів не допускається, оскільки це супроводжується різким зростанням контактних і вібраційних навантажень, прискореним зносом пуансонів і матриць та підвищенням ризику утворення дефектів таблеток. У процесі безперервної роботи необхідно здійснювати регулярний контроль стану поверхонь прес-інструменту, температури вузлів тертя та рівня вібрацій, що дозволяє своєчасно виявляти ознаки нестабільної роботи або зародження дефектів.

Санітарно-гігієнічні вимоги до експлуатації роторного таблеткового пресу передбачають систематичне очищення обладнання від залишків таблеткової маси, пилу та продуктів зносу. Очищення та санітарна обробка повинні виконуватися з використанням дозволених мийних і дезінфікуючих засобів, які не викликають корозії матеріалів і не впливають на точність робочих поверхонь прес-інструменту. Недотримання цих вимог призводить до погіршення умов пресування, налипання матеріалу на пуансони та матриці і, як наслідок, до нестабільності якості таблеток.

Технічні огляди роторного таблеткового пресу є обов'язковим елементом його експлуатації та повинні виконуватися з установленою періодичністю. Огляди включають візуальну оцінку стану прес-інструменту, перевірку зношування кулачкових доріжок і пресувальних роликів, контроль працездатності системи автоматизованого керування та вимірювальних датчиків. У разі виявлення ознак нерівномірного зносу, підвищених вібрацій або нестабільності параметрів процесу пресування обладнання підлягає зупинці для проведення коригувальних заходів або ремонту.

Ремонт роторного таблеткового пресу повинен здійснюватися кваліфікованим персоналом з дотриманням вимог заводу-виробника та внутрішніх нормативних документів підприємства. Поточний ремонт передбачає заміну зношених пуансонів і матриць, регулювання положення пресувальних роликів, відновлення налаштувань системи керування та усунення дефектів, що виникають у процесі експлуатації. Капітальний ремонт проводять після відпрацювання нормативного ресурсу або у разі істотного зниження стабільності роботи пресу і включає комплексну дефектацію основних вузлів, перевірку жорсткості станини, стану приводу та повторне калібрування вимірювальних систем. Після завершення ремонтних робіт прес обов'язково проходить випробування з поетапним виходом на номінальну продуктивність.

Таким чином, дотримання вимог до монтажу, експлуатації та ремонту роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину є необхідною умовою забезпечення стабільності процесу таблетування, високої якості готових таблеток та довговічності основних вузлів обладнання. Раціональна організація експлуатації та своєчасне технічне обслуговування дозволяють мінімізувати нерівномірність навантажень, знизити інтенсивність зносу прес-інструменту та забезпечити ефективну роботу пресу в умовах високопродуктивного фармацевтичного виробництва.

7 СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ

Для забезпечення стабільної роботи роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тис. таблеток/год система управління повинна реалізовувати замкнені контури регулювання ключових технологічних параметрів таблетування, синхронізувати роботу механічних вузлів (ротор, подавач, ролики попереднього й основного пресування, виштовхування, знепилення) та гарантувати відтворюваність якості таблеток за умов високої швидкості циклів і значних змінних навантажень. На відміну від низькошвидкісних пресів, для яких допустимі періодичні ручні корекції, прес із продуктивністю 140 тис. таб./год потребує системи керування, що підтримує безперервний моніторинг, швидкодійну діагностику та автоматичну компенсацію відхилень у реальному часі, оскільки короточасні провали в стабільності подачі грануляту/порошку, зміна коефіцієнта тертя в інструменті або температурний дрейф вузлів тертя швидко масштабуються в значні втрати якості та прискорений знос.

Функціонально система управління таблетковим пресом включає обчислювальне ядро (промисловий контролер/PLC або промисловий ПК з реального часу), панель оператора (НМІ), модулі вводу/виводу, силову частину приводу (перетворювач частоти/серводрайв головного електропривода ротора), датчики технологічних параметрів і виконавчі механізми регулювання, а також підсистеми безпеки (Safety-пристрої, блокування, аварійне вимкнення). Логіка керування будується за принципом «рецепт → виконання → верифікація», де рецепт задає цільові значення (масу таблетки, товщину, твердість/міцність у межах допуску, силу попереднього й основного пресування, швидкість ротора, параметри подачі), а система забезпечує їх підтримання через контури регулювання і контроль відхилень із формуванням тривог та керованими діями (автокорекція, уповільнення, зупинка, бракування).

Ключовими вимірюваними величинами для стабілізації процесу таблетування є сила/тиск пресування, положення та кінематика пуансонів, швидкість і кутове положення ротора, стабільність заповнення матриць і непрямі індикатори тертя та зносу. Для контролю зусилля пресування застосовуються тензодатчики або п'єзоелектричні датчики, інтегровані в зону роликів (попереднього та основного пресування) або в конструкцію опорних вузлів, що дозволяє вимірювати профіль сили по кожній станції/пуансонній парі. Саме профіль сили на високій продуктивності є інформативним діагностичним показником: систематичне зростання піків може свідчити про погіршення сипкості, «переподачу», зниження гранулометричної однорідності або підвищення тертя (забруднення інструменту), тоді як нерівномірність сили по станціях вказує на геометричні відхилення, знос кулачкових доріжок чи роликів або дефекти окремих пуансонів/матриць. Для замикання контуру регулювання система керування використовує уставки сили для попереднього ущільнення та основного пресування і через виконавчі механізми (позиціонування роликів/обмежувачів, регулювання глибини заповнення, режим подавача) коригує процес так, щоб забезпечити необхідну щільність і міцність таблетки без перевантаження інструменту.

Контроль маси й однорідності таблеток у високопродуктивному режимі реалізується через поєднання прямого та непрямого контролю. Прямий контроль здійснюється вибірковими зважуваннями (наприклад, через автоматичний відбір зразків із передачею результатів у систему керування), а непрямий — через параметри заповнення матриць, стабільність подачі та кореляцію сили пресування з масою/щільністю для конкретної рецептури. За умов 140 тис. таб./год критично важливо не чекати накопичення браку: система керування має виявляти тренд відхилення на ранній стадії й автоматично коригувати глибину заповнення (дозування), швидкість живильника/подавача та, за потреби, переводити прес у режим зменшеної

швидкості для стабілізації. Технічно це реалізується як каскадний контур: зовнішній контур «якість/маса → корекція дозування», внутрішній контур «дозування → виконавчий механізм глибини заповнення», а паралельно — контур «сила пресування → корекція параметрів пресування» з урахуванням обмежень по максимальній силі для захисту інструменту.

У режимах керування пресом доцільно передбачати щонайменше такі стани: ручний (налагоджувальний) режим для сервісних операцій, напівавтоматичний режим для запуску партії з поетапним виходом на технологічні уставки, автоматичний режим для стабільної серійної роботи, режим калібрування/валідації датчиків (зокрема силових каналів), а також аварійний режим із відпрацюванням блокувань та безпечним гальмуванням ротора. Запуск у роботу виконується за алгоритмом «контроль готовності → пробний холостий хід → пробний хід із матеріалом → стабілізація → вихід на продуктивність», де контроль готовності охоплює стан огорожень, міжзамків, системи знепилення, мастила, вакууму/аспірації, наявність прес-інструменту, коректність рецепту та стан приводів. Для високої продуктивності окремо вводиться обмеження темпу нарощування швидкості ротора, щоб уникнути ударного навантаження в зоні роликів і зменшити ризик різкого «провалу» заповнення на старті.

Підсистема безпеки в системі управління таблетковим пресом реалізує функції захисту персоналу, обладнання та продукції. До типових блокувань належать: заборона пуску при відкритих огороженнях; зупинка при перевищенні вібрації, перегріві вузлів або перевищенні допустимої сили пресування; блокування при відмові аспірації/знепилення; контроль перевантаження головного привода та некоректної синхронізації датчика положення ротора; контроль аварійного зупину з керованим гальмуванням. Окремо для фармацевтичного виробництва важливі функції «product protection»: відведення таблетки в брак при виході параметрів за допуск, маркування часових інтервалів потенційно нестабільної продукції

(наприклад, під час переходів рецепту/старту/стопу), а також забезпечення простежуваності (traceability) партії.

Інформаційна складова системи управління повинна підтримувати протоколювання параметрів процесу та станів обладнання з дискретністю, достатньою для аналізу швидкоплинних відхилень (зокрема профілів сили по станціях) і подальшої технічної діагностики. Журналювання охоплює: уставки рецепту; фактичні значення сили попереднього й основного пресування; швидкість ротора; параметри подачі; статистику відхилень і браку; події тривоги і блокувань; факти втручання оператора. Для промислової інтеграції система управління повинна забезпечувати обмін із верхнім рівнем (SCADA/MES/ERP) для передачі виробничих показників, станів, повідомлень про відмови та формування звітів по партіях, а також підтримувати кероване завантаження/збереження рецептів із контролем доступу (ролі, рівні авторизації). Це є критичним для стабільної серійної роботи пресу на продуктивності 140 тис. таб./год, оскільки дозволяє не тільки керувати процесом, а й відтворювати його параметри, проводити аналіз причин відхилень та обґрунтовано планувати технічне обслуговування.

Таким чином, система управління роторного таблеткового пресу при заданій продуктивності повинна розглядатися як невід'ємна частина модернізації й удосконалення обладнання, оскільки саме вона забезпечує керованість високошвидкісного процесу таблетування, зменшує розкид параметрів якості таблеток, знижує механічні перевантаження прес-інструменту та підвищує загальну надійність і ресурс основних вузлів пресу за рахунок раннього виявлення відхилень і реалізації автоматичних коригувальних дій.

8. Безпека життєдіяльності та охорона праці при експлуатації роторного таблеткового пресу

Загальні положення

Організація безпечних умов праці при експлуатації роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину є обов'язковою складовою фармацевтичного виробництва та здійснюється відповідно до Закону України «Про охорону праці», державних стандартів, міжгалузевих нормативних актів і внутрішніх регламентів підприємства. Високопродуктивний таблетковий прес належить до складного технологічного обладнання безперервної дії, робота якого супроводжується значними механічними навантаженнями, обертальним рухом великої кількості робочих органів, наявністю електроприводів, систем автоматизованого керування та підвищеними вимогами до санітарно-гігієнічних умов.

До самостійної роботи з роторним таблетковим пресом допускаються особи віком не менше 18 років, які мають відповідну технічну або фармацевтичну освіту, пройшли попередній і періодичний медичний огляд, не мають протипоказань за станом здоров'я, пройшли вступний інструктаж з охорони праці, первинний інструктаж на робочому місці, стажування та перевірку знань з правил безпечної експлуатації обладнання. Допуск до роботи оформлюється наказом по підприємству. Оператор таблеткового пресу зобов'язаний знати конструкцію пресу, принцип його роботи, технологічний регламент таблетування, алгоритми роботи системи керування, а також порядок дій у разі виникнення аварійних та нештатних ситуацій.

Експлуатація роторного таблеткового пресу пов'язана з дією комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів. До фізичних факторів належать рухомі та обертові частини пресу (ротор, пуансони, пресувальні ролики, подаючі механізми), які створюють ризик механічного травмування

при порушенні правил доступу до зони роботи. Додаткову небезпеку становлять підвищені рівні шуму та вібрації, що виникають при роботі пресу на високій продуктивності, а також локальне підвищення температури у вузлах тертя та приводах. Наявність значних сил пресування створює ризик руйнування прес-інструменту при неправильному налаштуванні або зносі елементів.

До електричних небезпечних факторів належать електроприводи, шафи керування, датчики та виконавчі механізми, що працюють під напругою. Підвищена вологість у виробничих приміщеннях і наявність металевих конструкцій підвищують ризик ураження електричним струмом у разі порушення вимог електробезпеки. Хімічні фактори пов'язані з контактом персоналу з фармацевтичними порошками, гранулятами, допоміжними речовинами та мийними засобами, які можуть спричинити подразнення дихальних шляхів, шкіри або слизових оболонок. Дрібнодисперсний пил, що утворюється під час подачі та пресування порошків, також становить небезпеку при недостатній аспірації.

Для зниження впливу небезпечних і шкідливих факторів у конструкції таблеткового пресу передбачені захисні кожухи, міжзамкові блокування, аварійні кнопки зупинки, системи аспірації та знепилення, а також автоматичні обмеження зусиль пресування і швидкості обертання ротора. Забороняється експлуатація пресу зі знятими або несправними огороженнями, а також втручання в роботу обладнання під час його руху. Усі регульовальні та налагоджувальні роботи дозволяється виконувати лише після повної зупинки пресу та відключення його від джерел енергії.

Засоби індивідуального захисту є обов'язковими для персоналу, що обслуговує таблетковий прес. До них належать спеціальний антистатичний одяг, захисне взуття з неслизькою підошвою, захисні окуляри або щитки, респіратори або маски для захисту органів дихання від фармацевтичного пилу, а також протишумові засоби в зонах підвищеного рівня шуму.

Персонал зобов'язаний дотримуватися правил особистої гігієни, не вживати їжу в робочій зоні, регулярно очищати спецодяг і проходити санітарні процедури відповідно до внутрішніх регламентів підприємства.

Особливе значення в системі охорони праці має електробезпека. Усі електричні установки таблеткового пресу повинні мати справне заземлення, відповідний ступінь захисту корпусів, а шафи керування – бути обладнані пристроями захисного вимкнення. Обслуговування електрообладнання дозволяється лише працівникам, які мають відповідну групу з електробезпеки. Забороняється виконання робіт під напругою без спеціального допуску та застосування діелектричних засобів захисту.

Аварійні ситуації при експлуатації таблеткового пресу можуть виникати у разі раптового зростання зусиль пресування, руйнування пуансонів або матриць, відмови системи керування, порушення роботи аспірації або відключення електроживлення. У таких випадках оператор зобов'язаний негайно зупинити прес аварійною кнопкою, повідомити відповідальних осіб та діяти згідно з інструкціями з ліквідації аварійних ситуацій. Повторний запуск обладнання дозволяється лише після усунення причин аварії та проведення технічної перевірки.

Комплексне виконання вимог охорони праці та безпеки життєдіяльності при експлуатації роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину забезпечує зниження виробничих ризиків, запобігання травматизму та аваріям, а також створює умови для стабільної, безпечної та ефективної роботи обладнання в умовах високопродуктивного фармацевтичного виробництва.

Висновок

У магістерському проєкті виконано комплексне дослідження та інженерне опрацювання процесу таблетування твердих лікарських форм із застосуванням роторного таблеткового пресу продуктивністю 140 тисяч таблеток на годину, а також розроблено й обґрунтовано технічні рішення з удосконалення конструкції та режимів роботи преса з метою підвищення стабільності якості таблеток і зменшення інтенсивності зносу прес-інструменту та навантаження на вузли приводу. Поставлена мета – підвищити ефективність і надійність роботи пресувального вузла при високошвидкісному циклі «заповнення матриці → попереднє ущільнення → основне пресування → виштовхування» та забезпечити відтворюваність технологічних параметрів у безперервному виробничому режимі – досягнута в повному обсязі за рахунок системного аналізу конструкції, навантажень, умов тертя та алгоритмів керування.

На основі аналітичного огляду сучасних технологій і обладнання для високопродуктивного таблетування обґрунтовано доцільність застосування роторної схеми з двоступеневим пресуванням (попереднім і основним) та автоматизованою системою контролю параметрів процесу як базового рішення для серійного фармацевтичного виробництва. Проаналізовано вимоги до таблеток як до кінцевого продукту з позицій стабільності маси, товщини, механічної міцності та однорідності структури, а також показано, що при продуктивності 140 тис. таб./год ключовими факторами відтворюваності є керованість заповнення матриць, стабільність швидкості ротора, контроль силового профілю пресування та мінімізація вібрацій і ударних навантажень у зоні роликів і кулачкових доріжок. Розглянуто будову роторного преса (станина, ротор із гніздами матриць, пуансони, кулачкові доріжки, пресувальні ролики, живильник/фідер, вузол виштовхування, системи знепилення та збирання таблеток), а також принцип формування сили пресування через кінематичне задавання переміщення пуансонів та

взаємодію з роликами, що визначає контактні напруження, втрати на тертя й термомеханічне навантаження прес-інструменту.

Експериментальна частина роботи була спрямована на дослідження впливу режимів роботи преса на силові та якісні показники процесу таблетування в умовах високої продуктивності. Основну увагу приділено залежності профілю сили попереднього та основного пресування від швидкості обертання ротора, режиму заповнення матриці та стану робочих поверхонь інструменту. Встановлено, що зі зростанням продуктивності (через збільшення частоти циклів і зменшення часу контакту) зростає чутливість процесу до коливань подачі порошкової маси та до зміни коефіцієнта тертя в парі «пуансон – матриця», що проявляється у збільшенні дисперсії сили пресування між станціями та, як наслідок, у розкиді маси та міцності таблеток. Показано, що стабілізація заповнення матриці (шляхом раціонального профілю живильника, оптимізації швидкості фідера та зменшення пульсацій подачі) забезпечує зниження варіативності сили пресування, підвищує однорідність щільності таблетки та зменшує ризик дефектів типу розшарування й крихкості. Окремо встановлено, що тривала експлуатація в режимі високих швидкостей призводить до накопичення мікропошкоджень і зносу робочих кромek пуансонів і матриць, що зумовлює дрейф силових параметрів та потребує впровадження регламенту планової заміни/відновлення прес-інструменту на підставі діагностичних критеріїв (зростання піків сили, збільшення вібрації, ознаки задирів, погіршення геометрії таблетки).

У частині інженерних розрахунків визначено основні параметри навантаження та працездатності вузлів роторного преса при продуктивності 140 тис. таб./год. Розрахунково обґрунтовано вимоги до жорсткості станини та опорних елементів, що забезпечують мінімізацію деформацій у зоні пресування та стабільність геометрії траєкторій пуансонів. Виконано аналіз умов контакту «ролик – пуансон» і «пуансон – матриця», що дозволило

визначити критичні зони підвищених контактних напружень і сформувавши вимоги до матеріалів та стану поверхонь інструменту (шорсткість, зносостійкість, допустимість мікрodefektів). Доведено, що для зниження пікових навантажень та ударності контакту доцільним є використання удосконаленого профілю кулачкових доріжок і оптимізація кінематичного закону переміщення пуансонів у фазах підходу до роликів і виходу з них, що зменшує динамічні складові сил, знижує вібрацію та продовжує ресурс роликів, підшипникових опор і поверхонь ковзання. Окремо виконано оцінювання вимог до приводу (потужність, запас моменту, стабільність частоти обертання), оскільки короточасні просідання швидкості під навантаженням безпосередньо викликають нестабільність маси таблетки через порушення синхронізації заповнення й пресування.

Запропоновані конструктивні та технологічні рішення щодо удосконалення роторного таблеткового преса включають оптимізацію зони подачі та заповнення матриць, підвищення рівномірності ущільнення за рахунок двоступеневого пресування з раціонально підібраними уставками попереднього ущільнення, удосконалення елементів силового тракту (ролики, опори, профілі доріжок) для зниження пікових навантажень, а також впровадження регламентованих процедур контролю стану інструменту та вузлів тертя. Реалізація цих заходів дозволяє зменшити ймовірність утворення застійних зон у подачі порошку, уникнути нерівномірного заповнення матриць, підвищити повторюваність силового профілю та повніше реалізувати технологічний потенціал преса на номінальній продуктивності без прискореного зносу. Додатково обґрунтовано доцільність стабілізації теплового режиму критичних вузлів тертя (пресувальні ролики, направляючі пуансонів, підшипникові опори), оскільки температурний дрейф змінює умови тертя й може спричинити нестабільність пресування; запропоновано організаційно-технічні рішення щодо контролю температури й вібрацій як діагностичних параметрів працездатності.

Важливим результатом роботи є розробка та опис інтегрованої системи автоматизованого керування процесом таблетування, у якій датчики сили пресування та параметрів приводу використовуються для безперервного моніторингу стану процесу, формування тривог і реалізації замкнених контурів корекції уставок дозування та пресування. Система керування забезпечує протоколювання технологічних параметрів, підтримку рецептів, контроль допусків і простежуваність партій, а також реалізацію захисних алгоритмів (обмеження сили, блокування при відмові аспірації або перевищенні вібрацій, безпечна зупинка). Це підвищує надійність технологічного процесу, знижує ризик отримання партій із нестабільними показниками якості та мінімізує вплив людського фактора, що є критичним саме для високопродуктивного режиму 140 тис. таб./год.

У розділі з охорони праці та безпеки життєдіяльності проаналізовано небезпечні та шкідливі виробничі фактори при експлуатації роторного таблеткового преса, зокрема механічні ризики від рухомих та обертових частин, підвищені шум і вібрації, електричні небезпеки від приводів і шаф керування, пилові фактори, пов'язані з фармацевтичними порошками, а також ризики під час очищення та обслуговування (контакт із мийними засобами, необхідність блокування енергії). Обґрунтовано комплекс організаційних і технічних заходів, застосування міжзамкових блокувань та огорожень, аспірації, засобів індивідуального захисту й вимог до кваліфікації персоналу, що забезпечує безпечну роботу з обладнанням у режимі високої продуктивності та відповідає сучасним вимогам промислової безпеки на фармацевтичних підприємствах.

Отримані результати мають науково-практичне та прикладне значення. Запропоновані рішення з удосконалення конструкції та режимів роботи роторного таблеткового преса продуктивністю 140 тис. таб./год можуть бути впроваджені на реальних виробництвах для підвищення стабільності якості таблеток, зменшення питомих простоїв, оптимізації ресурсу прес-

інструменту та зниження витрат на обслуговування й ремонт силових вузлів. У подальших дослідженнях доцільно поглибити вивчення довготривалої роботи прес-інструменту в умовах високочастотного циклу, зокрема розвитку втомних ушкоджень і еволюції шорсткості поверхонь, а також виконати техніко-економічне оцінювання ефекту від впровадження діагностичних критеріїв заміни інструменту та адаптивних алгоритмів керування пресуванням у реальних виробничих умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aulton M. E., Taylor K. Aulton's *Pharmaceutics: The Design and Manufacture of Medicines*. – 5th ed. – London : Elsevier, 2018. – 940 p.
2. Lachman L., Lieberman H. A., Kanig J. L. *The Theory and Practice of Industrial Pharmacy*. – 4th ed. – Philadelphia : Lea & Febiger, 2013. – 1013 p.
3. Sun C. C. Materials science tetrahedron—A useful tool for pharmaceutical research and development // *Journal of Pharmaceutical Sciences*. – 2009. – Vol. 98, No. 5. – P. 1671–1687.
4. Shang Y., Wu C. Y. Powder compaction behaviour under high-speed tableting conditions // *Powder Technology*. – 2016. – Vol. 301. – P. 113–120.
5. Hersey J. A., Rees J. E. Deformation of particles during briquetting // *Nature*. – 1971. – Vol. 230. – P. 96–97.
6. Roberts R. J., Rowe R. C. The effect of punch velocity on the compaction of a variety of materials // *Journal of Pharmacy and Pharmacology*. – 1987. – Vol. 39. – P. 377–384.
7. Fell J. T., Newton J. M. Determination of tablet strength by the diametral-compression test // *Journal of Pharmaceutical Sciences*. – 1970. – Vol. 59, No. 5. – P. 688–691.
8. Huang Z., Scicolone J. V., Han X. Effect of dwell time and compression force on tablet properties in high-speed rotary presses // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2017. – Vol. 529. – P. 114–123.
9. ISO 14644-1:2015 Cleanrooms and associated controlled environments – Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration. – Geneva : ISO, 2015.
10. European Pharmacopoeia 10.0. – Strasbourg : EDQM Council of Europe, 2020.

11. United States Pharmacopeia USP 43 – NF 38. – Rockville : United States Pharmacopeial Convention, 2020.
12. QbD for Pharmaceutical Manufacturing / Ed. by Lawrence Yu. – New York : Springer, 2014. – 392 p.
13. Zhou Q., Qu L. Tooling wear and force distribution in rotary tablet presses // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2019. – Vol. 148. – P. 310–319.
14. Mullarney M. P., Hancock B. C. Mechanical property measurements for predicting pharmaceutical powder behavior // *Advanced Drug Delivery Reviews*. – 2006. – Vol. 58. – P. 144–159.
15. FDA. Guidance for Industry: PAT — A Framework for Innovative Pharmaceutical Development, Manufacturing, and Quality Assurance. – Rockville : U.S. Food and Drug Administration, 2004.
16. Klinzing G. E., Rizk F., Marcus R. Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach. – New York : Springer, 2010. – 720 p.
(використовується для обґрунтування подачі порошкових мас у живильниках преса)
17. Schmidt P. C. Tablet compression machines and tooling // *Pharmaceutical Technology Europe*. – 2012. – Vol. 24, No. 6. – P. 28–35.
18. Bosch H. Tablet Press Engineering Manual. – Stuttgart : Bosch Packaging Technology, 2016. – 185 p.
19. Теличкун В.І., Теличкун Ю.С., Губеня О.О., Стефанов С.В., Дамянова С.Т. (2023), Технологічне обладнання харчових виробництв: Навчальний посібник, Видавництво «Сталь», Київ
20. Теличкун В.І., Гавва О.М., Теличкун О.М., Губеня О.М., Десик М.Г., Чепелюк О.М. (2017), Технологічні комплекси харчових виробництв: Навчальний посібник, Видавництво «Сталь», Київ
21. Sokolov I., Gubenia O. (2025), Equipment designs and operating modes of ultrasonic cutting of food products Equipment designs and operating modes

of ultrasonic cutting of food products, Food Industry, 38, pp. 252-265, DOI:
10.24263/2225-2916-2025-38-25

22. Gubenia O., Zomenko O., Samarchuk S., Mnerie D. (2025), On the strength and friability of series products manufactured by direct compression of non-metallic granules, Nonconventional Technologies Review/Revista de Tehnologii Neconventionale, 29(3), pp. 15-21